

Fud-program 2007

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

September 2007

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Fud-program 2007

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

September 2007

Förord

SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken. SKB har till uppgift att ta hand om det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet från reaktorerna. Kärntekniklagen kräver ett program för den allsidiga forskning och utveckling och övriga åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara avfallet på ett säkert sätt samt för att avveckla och riva kärnkraftverken. För att uppfylla det kravet presenterar SKB nu Fud-program 2007. Programmet redovisar översiktligt planerade åtgärder och de anläggningar som behövs för att lösa uppgiften med fokus på planerna för perioden 2008–2013. Det vi närmast överblickar är perioden 2008–2010. Detaljeringsgraden för de tre därpå följande åren är av naturliga skäl lägre.

Programmet ger underlag till att utforma system för att hantera och slutförvara det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken. SKB har för avsikt att slutförvara det använda kärnbränslet enligt KBS-3-metoden. I Fud-programmet redovisar vi vår verksamhet och planering för denna. Vi behandlar också samhällsforskning och andra metoder att slutförvara använt kärnbränsle. Planeringen för låg- och medelaktivt avfall, liksom för samhällsforskningen, redovisas i egna delar. Den granskning av programmet som kommer att ske kan tillföra värdefulla synpunkter utifrån. Myndigheterna och regeringen kan tydliggöra hur de ser på olika delar av verksamheten. Kommuner och andra intressenter får ett underlag för att framföra sina åsikter till SKB, myndigheterna eller regeringen.

Den viktigaste milstolpen under den kommande treårsperioden är att lämna in ansökningar enligt kärntekniklagen för slutförvaret för använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för slutförvarssystemet. Fud-program 2007 fokuserar därför på den teknikutveckling som behövs för att kunna realisera slutförvaret för använt kärnbränsle. Under 2007 avslutas platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar. Arbetet med att sammanställa ansökningarna för slutförvaret pågår. Till skillnad från de närmast föregående programmen innehåller Fud-program 2007 därför även en summering av platsundersökningsskedet och en framåtblick mot de moment som återstår innan slutförvaret kan tas i drift.

Fud-program 2007 består av sex delar:

- Del I SKB:s handlingsplan
- Del II Slutförvaret för använt kärnbränsle
- Del III Teknikutveckling inom kärnbränsleprogrammet
- Del IV Säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning
- Del V Samhällsvetenskaplig forskning
- Del VI Loma-programmet och rivningen

Del I och del II blickar framåt mot den tidpunkt då slutförvaret för använt kärnbränsle tas i drift. På vägen ska SKB passera ett antal milstolpar. Vid varje milstolpe ska ett visst tekniskt och vetenskapligt underlag finnas framme. Omfattningen av underlaget och de insatser som krävs inom teknikutveckling beskrivs i detalj i del III. Del IV fokuserar på resultaten från den forskning om långsiktiga förändringar som måste finnas framme inför nästa säkerhetsanalys, SR-Site. Del V beskriver vårt samhällsforskningsprogram och del VI ger en översikt över programmet för låg- och medelaktivt avfall (Loma) inklusive rivning. Det är vår förhoppning att ovanstående struktur och betraktelsesätt ger en tydlig bild av hur långt forskning och teknikutveckling har kommit inom olika områden och vilka faktorer som är viktigast för säkerheten i våra anläggningar.

Stockholm i september 2007
Svensk Kärnbränslehantering AB



Claes Thegerström
VD



Tommy Hedman
Chef, Avdelning Teknik

Sammanfattning

Fud-program 2007 redogör för SKB:s planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2008–2013. Planerna för den första treårsperioden är av naturliga skäl mer detaljerade än för den senare. SKB:s verksamhet är indelad i två huvudområden – kärnbränsleprogrammet och programmet för låg- och medelaktivt avfall (Loma-programmet).

Fud-program 2007 består av sex delar:

- Del I SKB:s handlingsplan
- Del II Slutförvaret för använt kärnbränsle
- Del III Teknikutveckling inom kärnbränsleprogrammet
- Del IV Säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning
- Del V Samhällsvetenskaplig forskning
- Del VI Loma-programmet och rivningen

Föregående Fud-program, Fud-program 2004, var främst inriktat på att belysa tillverkningen och förslutningen av kapslar för använt kärnbränsle. Anledningen till detta var att SKB:s närmaste mål då var att lämna in en ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen. Så skedde också hösten 2006. Nästa stora mål för SKB är att lämna in en ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret för använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet i slutet av 2009. Många av de insatser som beskrivs i Fud-programmet görs för att få fram tekniskt underlag för dessa. Detta Fud-program fokuserar därför på de insatser inom teknikutveckling som planeras, se vidare del III.

Nedan följer en kort sammanfattning av innehållet i respektive del.

Del I SKB:s handlingsplan

SKB:s handlingsplan delas upp i planering för kärnbränsleprogrammet och planering för Loma-programmet. Tidsplanen för att uppföra och ta i drift de anläggningar som behövs för att slutförvara det använda kärnbränslet och det låg- och medelaktiva avfallet styrs dels av behovet av tekniska utvecklingsinsatser, dels av lagstiftningens krav på tillstånd. Med utgångspunkt från detta har vi identifierat ett antal viktiga milstolpar.

De viktigaste milstolparna för kärnbränsleprogrammet är:

- Ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet samt ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret.
- Sammankoppling av Clab och inkapslingsanläggningen.
- Ansökningar om provdrift av slutförvaret samt av den integrerade inkapslingsanläggningen och Clab.
- Ansökningar om transporter av använt kärnbränsle.
- Ansökningar om rutinmässig drift av slutförvaret samt av den integrerade inkapslingsanläggningen och Clab.

De viktigaste milstolparna för Loma-programmet är:

- Säkerhetsredovisning för SFR 1.
- Torr mellanlagring av långlivat avfall från andra kraftverk än Oskarshamn i BFA (bergrum för avfall) på Simpevarpshalvön.
- Ansökan om licensiering av transportbehållare.
- Ansökan om utbyggt SFR.
- Ansökan om rutinmässig drift av utbyggt SFR.

Del II Slutförvaret för använt kärnbränsle

I denna del av Fud-programmet redovisas planerna för de delar av kärnbränsleprogrammet som avser slutförvaret för använt kärnbränsle. Redovisningen är strukturerad med utgångspunkt från det stegvisa genomförandet av programmet som beskrivs i SKB:s handlingsplan.

Nuläge

Platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar har i huvudsak avslutats. För närvarande slutförs arbetena med de slutliga versionerna av platsbeskrivande modeller, som i sin tur ska ligga till grund för nästa projekteringssteg och säkerhetsanalysen SR-Site.

Vår preliminära bedömning är att bilden av Forsmark inte kommer att förändras i någon avgörande grad. Projekteringen av anläggningen i Forsmark bygger på att förvaret kan förläggas inom det prioriterade området och att anläggningar och verksamheter ovan mark i huvudsak kan inrymmas inom det befintliga industriområdet. Förvarets djup bör ökas från tidigare föreslagna 400 meter till mellan 450 och 500 meter. Motiven för detta är att bergspänningarna inte ökar lika snabbt mot djupet som vi antog att de skulle göra. Sprickzonernas läge gör det också enklare att placera ut deponeringsområdena på den lägre nivån jämfört med närmare ytan.

Undersökningarna i Laxemar kommer att avslutas under första kvartalet 2008. Efter den inledande platsundersökningen utarbetades en preliminär layout för ett förvar på 500 meters djup. I och med att undersökningarna senare förskjutits till de södra och västra delarna av området kommer layouten troligen att genomgå stora förändringar. De data som tillkommit efter den inledande platsundersökningen bekräftar bilden av Laxemar, men visar också på lägre sprickfrekvens och lägre vattengenomsläpplighet jämfört med data från de delar som låg till grund för SR-Can.

Tillståndsprövning

För att etablera och driva verksamheten vid slutförvaret fordras – liksom för inkapslingsanläggningen och Clab – tillstånd både enligt kärntekniklagen och enligt miljöbalken. Därutöver måste verksamheten vara förenlig med kommunens gällande detaljplan och områdesbestämmelser samt ha beviljats bygg- och marklov. Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Kommunfullmäktige beslutar att tillstyrka verksamheten.
- Regeringen beslutar om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen.
- Kommunen antar detaljplan.
- Miljödömsstolen ger tillstånd och meddelar villkor enligt miljöbalken.
- SKI meddelar villkor enligt kärntekniklagen.
- SSI meddelar villkor enligt strålskyddslagen.
- SKB lämnar in ansökan om bygglov.
- Kommunen beslutar om bygglov.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och kommer att vara mellan sex och sju år. Verksamheten domineras av omfattande bergarbeten. Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Etablering och byggstart.
- Skipschakt klart.
- Start bergarbeten på förvarsnivå.
- Ramp klar.
- Centralområdet klart.
- Produktionsbyggnaden klar.
- Förnyad säkerhetsredovisning.
- Anläggningar och installationer för samfunktionsprovning klara.
- Ovanjordsanläggningar klara.

Driftsättning

Driftsättningen av slutförvaret inleds när bergarbeten och tekniska installationer på förvarsnivån kommit så långt att detta är möjligt. Maskiner, hanteringsutrustningar och delar av ovanjordsanläggningen ska finnas på plats. Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Start samfunktionsprovning.
- Förnyad säkerhetsredovisning.
- Ansökan om provdrift inlämnad.

Drift

När driftskedet startar har SKB fått tillstånd för provdrift. Kapslar med använt kärnbränsle anländer då för första gången till slutförvaret. En viktig milstolpe under detta skede är övergången från provdrift till rutinmässig drift.

Del III Teknikutveckling inom kärnbränsleprogrammet

Ansökan bygger på ett KBS-3-förvar med vertikal deponering. De olika systemdelarna i slutförvaret (kapsel, buffert, återfyllning etc) ska uppfylla speciella krav som finns definierade i SKB:s kravdatabas. Deras egenskaper bestäms av de konstruktionsförutsättningar och specifikationer som tas fram, men även av de produktions- och kontrollmetoder som används. För att åskådliggöra detta använder vi oss av begreppet produktionslinjer. SKB har valt att definiera sex produktionslinjer:

- Berglinjen
- Bränslelinjen (inkluderas i Kapsellinjen i detta Fud-program)
- Kapsellinjen
- Buffertlinjen
- Återfyllningslinjen
- Förslutningslinjen

Teknikutvecklingen bedrivs till stor del i samarbete med Posiva (Finland), som också har KBS-3-metoden som grund för sitt arbete.

Förutom produktionslinjerna behandlar Fud-program 2007 även återtag av kapslarna och den alternativa förvarsutformningen, KBS-3H (horisontell deponering). När det gäller återtag är inga speciella utvecklingsinsatser planerade för den kommande Fud-perioden. Målsättningen för en eventuellt fortsatt utveckling av KBS-3H är att uppfylla kraven på långsiktig säkerhet och att kunna jämföra med referensalternativet. Beslut om en fortsättning kan fattas när utvärderingen av det pågående projektet är klar i slutet av 2007. De insatser som presenteras i del III grundar sig på antagandet att beslutet blir positivt.

Berglinjen

Berglinjen omfattar bygget av alla utrymmen i slutförvarets undermarksanläggning. Främst är det två frågor som kräver teknikutveckling: injektering och kontroll av den störda zonen. Vi måste utveckla metoder, injekteringsmedel och utrustning för att kunna klara de inflöden som kan förekomma i slutförvaret. Speciellt gäller det att lära sig att täta små sprickor med höga vattentryck. Det material som används får heller inte ge upphov till ett lakvatten med för högt pH så att bufferten påverkas negativt. När man bygger tunnlar och berggrum bildas det sprickor i berget närmast tunnelväggen. Området där sprickorna finns kallas den störda zonen. Hur stor den störda zonen blir beror bland annat på vilken metod som används. I dag vet vi hur vi ska begränsa den störda zonens utsträckning. Däremot saknar vi tillräcklig kunskap om hur de hydrauliska egenskaperna ändras om graden av störning förändras.

Buffertlinjen

Buffertlinjen innehåller moment som tillverkning, hantering och installation av den bentonitbuffert som omger kapslarna i deponeringshålen. SKB har provat två metoder för att pressa blocken och ringarna: enaxlig pressning och isostatisk pressning. Vi har ännu inte valt referensmetod. Båda teknikerna måste vidareutvecklas innan de kan användas i industriell skala. Installation av bufferten kommer att demonstreras i Bentonitlaboratoriet. Inför denna måste bland annat ett lyftverktyg och en strålskärmslucka, som förhindrar direktstrålning upp i deponeringstunneln, tas fram. I Bentonitlaboratoriet kommer också försök att göras för att fastställa högsta hanterbara vattenflöde in i deponeringshålen.

Kapsellinjen

Kapsellinjen beskriver hur kapslarna, som det använda kärnbränslet ska kapslas in i, tillverkas, försluts transporteras och deponeras. Vi valde år 2005 friction stir welding som referensmetod för att försluta kapseln. Det som återstår nu är att vidareutveckla tillverkningsmetoderna för de olika kapselkomponenterna. Ett antal provtillverkningar är inplanerade under den närmaste perioden. Både svetsar och kapselkomponenter ska kontrolleras med oförstörande provning. Utvecklingen har kommit långt när det gäller provningen av svetsar. Metodutveckling pågår fortfarande för provningen av kapselkomponenter.

Återfyllningslinjen

Återfyllningslinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av återfyllning i deponeringshålens översta del. Efter den senaste säkerhetsanalysen, SR-Can, kunde vi konstatera att en återfyllning bestående av block av svällande lera fungerade bäst i slutförvaret. De moment som kommer att kräva störst utvecklingsinsatser under den kommande Fud-perioden är installation av återfyllning i den övre delen av deponeringshålet samt återfyllning med block och pelletar eller granuler i deponeringstunneln. Återfyllningsmetoden kommer att testas i full skala i Äspölaboratoriet efter inledande försök i Bentonitlaboratoriet. Vi behöver också utreda var gränsen går för det högsta tillåtna inflödet av vatten till deponeringstunneln. Detta görs i Bentonitlaboratoriet, där det finns möjlighet att variera storleken på vattenflödet.

Förslutningslinjen

Förslutningslinjen innehåller sådana moment som behövs för att återfylla och plugga alla andra utrymmen än deponeringstunnlarna i slutförvaret. Dessutom ingår förslutning av undersökningsborrhål från ytan och från tunnlar i slutförvaret. En fråga som ska utredas under kommande Fud-period är hur återfyllningens egenskaper förändras när den fryser i de ytliga delarna av tunnlar och schakt och sedan tinar upp igen. Det grundläggande konceptet för att försluta undersökningsborrhål är att tätta dem med perforerade kopparrör, som är fyllda med högkompakterad smektitisk lera. Dessutom finns andra metoder, som också de bygger på tätning med smektitisk lera, för att försluta borrhål. Under den kommande perioden kommer SKB att tillsammans med Posiva demonstrera förslutning av upp till 1 000 meter djupa borrhål.

Del IV Säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning

Den långsiktiga säkerheten i slutförvaret prövas och utvärderas med hjälp av säkerhetsanalyser. Arbetet med säkerhetsanalyserna är koncentrerat till att pröva säkerheten för ett KBS-3-förvar med vertikal deponering. Mycket förenklat går en säkerhetsanalys till så att man beskriver förvarets initialtillstånd för att sedan kartlägga vilka förändringar som kan tänkas inträffa på lång sikt och vilka konsekvenser dessa får för människa och miljö. Förändringarna drivs genom olika processer, som kan vara:

- Termiska – orsakade av värmeutveckling.
- Hydrauliska – orsakade av strömmande gas eller vätska.
- Mekaniska – orsakade av höga tryck och plötsliga rörelser i berget.
- Kemiska – orsakade av kemiska reaktioner.

I säkerhetsanalysen beskrivs de olika processerna med modeller. Ibland påverkar processerna varandra så mycket så att vi måste betrakta dem som sammankopplade system, genom så kallad integrerad modellering. Indata till modellberäkningarna kommer från de resultat som forskningsverksamheten och platsundersökningarna levererar.

Förutom att studera de processer som förekommer i ett KBS-3-förvar följer SKB också utvecklingen av två andra metoder för att ta hand om använt kärnbränsle: separation och transmutation samt deponering i djupa borrhål.

Säkerhetsanalys

SKB:s senaste säkerhetsanalys kallas SR-Can och lämnades in till myndigheterna den 1 november 2006. Analysen gjordes enligt en noga utprovad analysmetodik i tio steg. Metodiken anses nu till stora delar vara mogen och ska även användas i nästa säkerhetsanalys, SR-Site. SR-Site kommer att utgöra en del av underlaget till ansökan för slutförvaret. För de flesta processer i slutförvaret har vi i dag tillräcklig kunskap för att fylla säkerhetsanalysens behov. Inom några områden finns dock kunskapsluckor som måste fyllas inför SR-Site.

Klimatutveckling

SKB:s klimatprogram ligger som en bas för forskningsverksamheten. Klimatet förändras kontinuerligt och påverkar strandlinjeförskjutning samt utveckling av permafrost och inlandsisar i Sverige. Detta påverkar i sin tur både miljön på markytan och nere i berget. En viktig fråga för klimatprogrammet är att kartlägga vilka klimattillstånd som är möjliga och beskriva hur de kan påverka slutförvarets säkerhet på lång sikt. En fråga som vi behöver veta mer om är hur en inlandsis påverkar hydrologin och hydrokemin i området runt ett slutförvar. Därför tänker vi starta ett projekt på västra Grönland i närheten av inlandsisen i samarbete med Posiva. Bergarterna där påminner mycket om dem i Oskarshamn och Forsmark. Vi kommer också att studera hur ett varmare klimat påverkar havsyttans nivå, hur permafrost breder ut sig samt vad som händer om återfyllningsmaterialet fryser.

Bränsle

Även programmet för bränsle innehåller kvarstående frågetecken. Främst är det bränsleupplösningen som är ett prioriterat område. I och med att kraftföretagen har aviserat att de vill öka medelutbränningsgraden för både PWR- och BWR-bränsle upp till 60 MWd/kgU krävs också ytterligare beräkningar av exempelvis radionuklidinventarium, resteffekt och kriticitet inför SR-Site. Nya lagningsförsök måste också göras.

Kapseln som barriär

Kapseln är den viktigaste barriären för att isolera det använda kärnbränslet. SKB:s referenskapsel består av en inre behållare av segjärn och ett yttre hölje av koppar. Här koncentreras forskningsinsatserna främst på att undersöka hur kapselns insats och hölje deformeras. Det rör sig både om yttre påverkan av exempelvis jordbävningar och inre påverkan genom att korrosionsprodukter bildas och bygger upp ett övertryck inne i kapseln. Korrosion – och då främst spänningskorrosion – är ett annat område där det ännu finns kvarstående frågor. Den höga stråldos som segjärnsinsatsen utsätts för skulle kunna leda till att materialet blir sprödare. Konsekvenserna av detta kommer att utredas vidare.

Buffert

Bufferten ska skydda kapslarna, men även fungera som ett filter och förhindra att radioaktiva ämnen från en otät kapsel sprids i omgivningen. För att utvärdera säkerheten är det viktigt att kunna förutsäga vilket tillstånd bufferten når efter deponeringen. Vattenmättnadsförloppet styrs av såväl hydrauliska som termiska och mekaniska processer och studeras både i fält och genom modellering. När bufferten är mättad med vatten är den lättare att beskriva, men det finns fortfarande en rad processer som måste studeras, till exempel gastransport, kolloidbildning och framför allt erosion.

Återfyllning

Återfyllningen ska stabilisera tunnlarna, hålla bufferten på plats och hindra vattenflödet genom tunnlarna. Svällning är – liksom för bufferten – en viktig process för återfyllningen. Processer som kan påverka svällningen blir därigenom också viktiga. Under nästkommande Fud-period kommer vi därför att speciellt studera inverkan av frysning och erosion.

Geosfär

Utvecklingen av modeller för berg rörelser kommer att pågå även under nästa Fud-period. En frågeställning som speciellt utreds är effekterna av jordskalv.

Mikrober kan påverka förhållandena i slutförvaret både positivt och negativt. Studierna av mikrobernas roll kommer att fortsätta.

Modelleringen av radionuklidtransport utvecklas vidare. Bland annat ska den nya programkoden Marfa testas.

Biosfär

Biosfären är den del av jordklotet där den stora majoriteten av allt liv finns. Det är också där ett utsläpp från slutförvaret skulle kunna få några konsekvenser i form av stråldos till människor och organismer. Biosfärsprogrammet har tagit ett stort steg framåt i och med att vi nu kan göra ekosystembaserade modeller för platserna och på så sätt följa de radioaktiva ämnens väg. Vi beräknar också stråldosen till människan på ett helt nytt sätt, baserat på massflöden av vatten och organiskt kol i ekosystemen.

Andra metoder

SKB följer utvecklingen av andra metoder för att hantera, behandla och slutförvara kärnavfall. Insatserna rör främst separation och transmutation samt deponering i djupa borrhål. Vad gäller djupa borrhål pågår ett arbete med en översiktlig systematisk jämförelse mellan denna metod och KBS-3-metoden. Vår grundläggande bedömning från tidigare rörande djupa borrhål ligger fast. Metoden uppfyller inte kraven på kontrollerad deponering i alla steg och är behäftad med sådana principiella osäkerheter att det inte är motiverat att satsa på att utveckla metoden vidare.

Del V Samhällsvetenskaplig forskning

SKB bedriver och finansierar även forskning inom det samhällsvetenskapliga området. Syftet är att kunna ge beslutsfattare på olika nivåer ett breddat beslutsunderlag som även belyser kärnavfallsfrågan ur ett samhällsperspektiv. Fyra samhällsvetenskapliga forskningsområden har bedömts som särskilt relevanta:

- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter
- Beslutsprocesser
- Opinion och attityder – psykosociala effekter
- Omvärldsförändringar

Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter

Socioekonomisk påverkan omfattar både snävt ekonomiska aspekter som sysselsättning och industri-etablering samt samhällsekonomiska effekter. Den forskning som SKB stöder ska öka kunskapen om hur enskilda orters ekonomi och befolkningssammansättning påverkas av att en ny och stor anläggning etableras på orten. Kunskapen kan bidra till såväl SKB:s som de berörda kommunernas och andra intressenters bedömningar av hur etableringen av slutförvaret kan komma att påverka ortens ekonomi och befolkningsutveckling.

Beslutsprocesser

Lokalisering av ett slutförvar för använt kärnbränsle har kopplingar till både lokal samhällsplanering, nationell energipolitik och internationellt arbete. Genom att ta fasta på politiska frågor av denna speciella karaktär är syftet med forskningen att lägga grunden för en generell kunskap om beslutsprocesser kring komplexa frågor. Denna kunskap kan i sin tur lämna bidrag vid genomförandet av samråd, utredningar, planeringsinsatser och beslutsfattande.

Opinion och attityder – psykosociala effekter

Syftet med forskningsområdet är att studera hur opinioner och attityder uppkommer och förändras. Denna kunskap bidrar till förståelsen för olika aktörers beslutsfattande. Opinioner och attityder är inte bara en spegling av beslutsfattande, faktiska händelser och kommunicerade budskap. Individuella egenskaper och verklighetsuppfattningar spelar också roll. Djupt liggande värderingar och normer, identifikation, upplevda rädslor och oro för risker samt egenintresse är några exempel på faktorer som också har betydelse för opinionsbildning och attityder. Det är därför också betydelsefullt att belysa ”symboliken” kring slutförvaret och dess verksamhet.

Omvärldsförändringar

Etableringen av slutförvaret är en fråga som tydligt hänger samman med förändringar i vår omvärld. Forskning inom området kan öka kunskapen om relevanta omvärldsfaktorer och omvärldsförändringar. Denna kunskap kan vara värdefull som tillskott till planering, utredningar, samråd och beslutsfattande inför och efter tillståndsansökningarna. Kunskapen kan också vara viktig för den framtida driften av slutförvaret. Den enskilda ortens ekonomiska situation och utveckling beror på en mängd olika omständigheter i omvärlden. Hur ser den framtida svenska stat ut som ska ta ansvar för slutförvaret? Lagstiftning, reglering och finansiering liksom landets ekonomiska situation påverkar. En annan viktig omvärldsförändring är Sveriges deltagande i utvecklingen av det europeiska politiska och ekonomiska samarbetet.

Del VI Loma-programmet och rivningen

Loma-programmet omfattar allt låg- och medelaktivt avfall som ska slutförvaras i SKB:s anläggningar. De anläggningar som omfattas av SKB:s Fud-program är SKB:s befintliga och framtida egna anläggningar för slutförvaring av avfall från de svenska kärnkraftverken. Mellanlagring av långlivat låg- och medelaktivt avfall från kärnkraftverken i BFA (bergrum för avfall) ingår också i Loma-programmet. Kärnavfallsfonden finansierar slutförvaringen av rivningsavfall och slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. SKB kan även komma att ta hand om radioaktivt avfall från Studsvik, Ågestareaktorn, bränslefabriken i Västerås och Ranstad. Omhändertagandet av avfallet från dessa anläggningar kommer då att finansieras separat. Slutförvaring av driftavfallet från kärnkraftverken finansieras direkt av kraftverkens tillståndshavare.

Inom området avveckling och rivning ingår att genomföra rivningsstudier i syfte att uppskatta avfallsmängder, såväl radioaktivt som inaktivt och friklassat material, samt att bedöma kostnaderna för avvecklingen. Studierna baseras på strategier och tekniker som tas fram i samarbete med kraftverksägarna. SKB omhändertar enbart det radioaktiva avfallet, dock kalkylerar SKB volymerna och kostnaderna för allt rivningsavfall i sina studier.

Under den kommande treårsperioden är de viktigaste milstolparna:

- Färdigställande av en ny säkerhetsredovisning (SAR) för slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1) som delges myndigheterna vid årsskiftet 2007/2008.
- Projektering och komplettering av befintligt BFA på Simpevarpshalvön för mellanlagring av härdkomponenter.
- Licensiering och tillverkning av avfallstransportbehållare ATB-1T för medelaktivt långlivat avfall. Underlaget för licensieringen blir klart under 2009. Tillverkningen påbörjas ett år senare.
- Planeringen för en utbyggnad av SFR påbörjas under 2007. Den utbyggda delen av anläggningen ska kunna tas i drift 2020. Undersökningar av berget startar under 2008.

Den närmaste sexårsperioden omfattar även följande milstolpar:

- Driftstart för torr mellanlagring av långlivat avfall från andra kraftverk än Oskarshamn i BFA (bergrum för avfall), tidigast i slutet av 2011. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring.
- Ansökan om att bygga ut SFR. Framtagning av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) samt en miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Enligt planerna ska ansökan lämnas till myndigheterna 2013.

Planeringen för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) påbörjas efter det att ansökan om att bygga ut SFR har lämnats in. Driftstarten för SFL beräknas tidigast infalla år 2045. Avfallsmängderna till SFL är relativt små och anläggningen kommer att vara den som sist försluts, eftersom den ska ta emot avfall från övriga anläggningar fram till och med avveckling och rivning av dessa. Med hänsyn till de små volymer som är aktuella bedömer SKB att det är rimligt att avvakta med utbyggnaden till dess huvuddelen av avfallet finns tillgängligt för deponering.

Innehåll

Del I SKB:s handlingsplan

1	Hanteringen av radioaktivt avfall	23
1.1	SKB:s handlingsplan	23
1.2	SKB:s uppdrag	24
1.3	SKB:s utgångsläge	24
1.3.1	SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration	24
1.3.2	Befintliga anläggningar	27
1.3.3	Resurser för forskning, utveckling och demonstration	31
1.3.4	Resurser i form av kompetens och organisation	33
1.3.5	Finansiella resurser	34
1.4	SKB:s strategi	35
1.4.1	Strategiska metodval för att slutförvara använt kärnbränsle	36
1.4.2	Strategier för låg- och medelaktivt avfall	36
1.4.3	Lokalisering	37
1.4.4	Tillkommande anläggningar	37
1.5	Förutsättningar för planeringen	40
1.6	SKB:s huvudtidsplan	41
2	Kärnbränsleprogrammet	43
2.1	Planering	44
2.2	Milstolpar	44
2.2.1	Ansökningar, anmälningar och redovisningar	44
2.2.2	Andra viktiga milstolpar	46
2.3	Alternativ förvarsutformning – KBS-3H	47
2.4	Kravhantering och kvalificering	48
3	Loma-programmet	51
3.1	Planering	52
3.1.1	Planering för SFR	52
3.1.2	Planering för BFA	52
3.1.3	Planering för SFL	52
3.1.4	Planering för rivning	53
3.2	Milstolpar för SFR	53
3.2.1	Ansökningar, anmälningar och redovisningar	53
3.2.2	Andra viktiga milstolpar	54
3.3	Milstolpar för BFA	54
3.3.1	Ansökningar och anmälningar	54
3.3.2	Andra viktiga milstolpar	54
3.4	Milstolpar för SFL	54
3.5	Milstolpar för rivning	55
3.5.1	Ansökningar, anmälningar och redovisningar	55
3.5.2	Andra viktiga milstolpar	55

Del II Slutförvaret för använt kärnbränsle

4	Nuläge	59
4.1	Lokaliseringalternativen	59
4.1.1	Forsmark	61
4.1.2	Laxemar	64
4.2	Återkoppling från platsundersökningarna till Fud-arbetet	69
4.2.1	Undersökningar	69
4.2.2	Modeller för platsbeskrivning	70
4.3	Samlad utvärdering och platsval	71
4.3.1	Kunskapsläge efter platsundersökningarna	71
4.3.2	Metodik och planering för platsvalet	72

5	Utgångspunkter för uppförande och drift	75
5.1	Huvudskeden och tidsplan	75
5.1.1	Tillståndsprovning	75
5.1.2	Uppförande	76
5.1.3	Driftsättning	76
5.1.4	Drift	77
5.2	Beslutspunkter och milstolpar	77
5.2.1	SKB:s egna beslut och etappmål	77
5.2.2	Myndighetsbeslut	77
5.3	Teknikbehov	78
6	Arbetsmetodik under uppförande och drift	83
6.1	Anläggningsdelar	83
6.2	Viktiga begrepp	85
6.3	Metodik för projektering och bygge av utrymmen under mark	86
6.3.1	Hittills tillämpad projekteringsmetodik	86
6.3.2	Utgångspunkter för arbetsmetodik under uppförande och drift	87
6.3.3	Metoder för dimensionering av berganläggningar	87
6.4	Metodik för projektering av övriga anläggningar	89
6.5	Huvudprocesser och viktiga delprocesser	89
6.5.1	Huvudprocesser	89
6.5.2	Viktiga delprocesser	94
6.6	Kvalitetsstyrning	97
6.7	Safeguard för slutförvaret	98
7	Huvudskede tillståndsprovning	99
7.1	Milstolpar	100
7.2	Verksamhet	101
7.3	Teknikbehov	101
8	Huvudskede uppförande	105
8.1	Milstolpar	105
8.2	Verksamhet	105
8.2.1	Undersökningar	105
8.2.2	Långtidsobservationer	106
8.2.3	Projektering	106
8.2.4	Platsmodellering, säkerhetsbedömning och säkerhetsanalys	106
8.2.5	Bergarbeten	107
8.2.6	Tekniska installationer	108
8.2.7	Ovanmarksdelen	108
8.3	Teknikbehov	108
9	Huvudskede driftsättning	111
9.1	Milstolpar	111
9.2	Verksamhet	111
9.3	Teknikbehov	111
10	Huvudskede drift	113
10.1	Milstolpar	113
10.2	Verksamhet	113
10.2.1	Provdrift	113
10.2.2	Rutinmässig drift	113
10.2.3	Transport och mottagningskontroll	115
10.2.4	Fysiskt skydd	116
10.2.5	Tillverkning av buffert och återfyllnad	116
10.2.6	Drift och underhåll av tekniska system	117
Del III Teknikutveckling inom kärnbränsleprogrammet		
11	Översikt – teknikutveckling	121
11.1	Berglinjen	122
11.2	Buffertlinjen	124
11.3	Kapsellinjen	124

11.4	Återfyllningslinjen	125
11.5	Förslutningslinjen	126
11.6	Återtag	126
11.7	Alternativ förvarsutformning – KBS-3H	126
11.8	Teknikutveckling i SKB:s laboratorier	127
12	Berglinjen	129
12.1	Nuläge	130
12.2	Krav och förutsättningar	130
12.3	Undersökning och karakterisering	131
12.3.1	Stabilisering av borrhål	132
12.3.2	Laserskanning	133
12.3.3	Geofysiska borrhålsinstrument	133
12.3.4	Bergmekaniska mätningar	134
12.3.5	Mätning av bergets termiska egenskaper	135
12.3.6	Utrustning för hydrotester (enhålstester)	135
12.3.7	Mätning av vattenflöden i ramp och tunnlar	136
12.3.8	Mätning av inflöde till deponeringshåll	136
12.3.9	Bestämning av sorptionsparametrar	137
12.3.10	Bestämning av pH och redoxförhållanden	137
12.3.11	Informationssystem och informationsteknik	138
12.4	Tätning med injektering	138
12.5	Borrning och sprängning av bergutrymmen	141
12.6	Bergförstärkning	146
12.7	Borrning av deponeringshåll	147
12.7.1	Borrning	147
12.7.2	Uttag av avfasning i deponeringshålet	148
13	Buffertlinjen	149
13.1	Nuläge	150
13.2	Krav och förutsättningar	150
13.3	Tillverkning av buffert	151
13.3.1	Pressning av ringar och block	151
13.3.2	Tillverkning av pelletar och granuler	152
13.4	Mellanlagring	152
13.5	Inredning av deponeringshåll	153
13.6	Installation av block och ringar	154
13.7	Installation av pelletar eller granuler	155
14	Kapsellinjen	157
14.1	Nuläge	158
14.2	Krav på kapseln	159
14.3	Tillverkning och oförstörande provning av insatsen	162
14.3.1	Tillverkning	162
14.3.2	Oförstörande provning	163
14.4	Tillverkning och oförstörande provning av kopparhöljet	167
14.4.1	Tillverkning	167
14.4.2	Oförstörande provning	170
14.5	Förslutning och oförstörande provning av svetsen	172
14.5.1	Svetsning	172
14.5.2	Oförstörande provning	177
14.6	Bränsle i inkapslingsanläggningen	180
14.6.1	Torkning av bränsle	180
14.6.2	Mätning av resteffekt	181
14.7	Transportbehållare för inkapslat bränsle	181
14.7.1	Krav på transportbehållare	181
14.7.2	Transportbehållarens utformning	182
14.8	Hantering av kapseln i slutförvaret	183
15	Återfyllningslinjen	187
15.1	Nuläge	188
15.2	Krav och förutsättningar	188

15.3	Pressning av återfyllningsblock	189
15.4	Tillverkning av pelletar och granuler	190
15.5	Avlägsnande av dränage och temporärt buffertskydd	190
15.6	Installation av återfyllningsblock	191
15.7	Installation av pelletar eller granuler	192
15.8	Installation av en temporär plugg i deponeringstunneln	193
16	Förslutningslinjen	195
16.1	Nuläge	195
16.2	Krav och förutsättningar	196
16.3	Tillverkning och installation av återfyllning	196
16.4	Installation av pluggar	197
16.5	Förslutning av borrhål	197
16.5.1	Tätning av borrhål	197
16.5.2	Rensning och stabilisering av borrhål	198
17	Återtag	199
17.1	Nuläge	199
17.2	Krav	200
17.3	Friläggning av kapsel	200
17.4	Avvattning av genererat slam	201
18	Alternativ förvarsutformning – KBS-3H	203
18.1	Nuläge	203
18.2	Utformning	204
18.3	Demonstration i Äspölaboratoriet	205
18.4	Långsiktig säkerhet	206
Del IV Säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning		
19	Översikt – säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning	211
19.1	Säkerhetsanalys	211
19.2	Forskning om långsiktig säkerhet	211
19.2.1	Klimatutveckling	212
19.2.2	Bränsle	212
19.2.3	Kapseln som barriär	215
19.2.4	Buffert	215
19.2.5	Återfyllning	216
19.2.6	Geosfär	216
19.2.7	Biosfär	217
19.2.8	Forskning i Äspölaboratoriet	217
19.3	Andra metoder	218
19.3.1	Separation och transmutation	218
19.3.2	Djupa borrhål	219
20	Säkerhetsanalys	221
20.1	Metodik för att analysera förvarets långsiktiga säkerhet	221
20.1.1	Metodik i SR-Can	221
20.1.2	Program	227
20.2	Integrerad modellering	229
20.2.1	Systemutveckling	229
20.2.2	Radionuklidtransport	229
21	Klimatutveckling	231
21.1	Klimatscenarier i säkerhetsanalysen	231
21.2	Inlandsisdynamik och glacial hydrologi	234
21.3	Isostatiska förändringar och strandlinjeförskjutning	238
21.4	Permafrosttillväxt	240
21.5	Klimat och klimatvariationer	242
22	Bränsle	245
22.1	Initialtillstånd i bränsle/hållrum	245
22.1.1	Variabler	245
22.1.2	Geometri	245

22.1.3	Strålintensitet	246
22.1.4	Temperatur	246
22.1.5	Hydrovariabler	246
22.1.6	Mekaniska spänningar	246
22.1.7	Totalt radionuklidinventarium	247
22.1.8	Gapinventarium	247
22.1.9	Materialsammansättning	247
22.1.10	Vattensammansättning	248
22.1.11	Gassammansättning	248
22.2	Processer i bränsle/hårum	248
22.2.1	Översikt av processer	248
22.2.2	Radioaktivt sönderfall	249
22.2.3	Stråldämpning/värmealstring	249
22.2.4	Inducerad fission – kriticitet	249
22.2.5	Värmetransport	250
22.2.6	Vatten- och gastransport i kapselns hårum, kokning/kondensation	250
22.2.7	Termisk expansion/kapslingsbrott	250
22.2.8	Advektion och diffusion	250
22.2.9	Restgasradiolys/syrabildning	250
22.2.10	Vattenradiolys	251
22.2.11	Metallkorrosion	251
22.2.12	Bränsleupplösning	251
22.2.13	Lösning av gapinventarium	254
22.2.14	Speciering av radionuklider, kolloidbildning	255
22.2.15	Heliumproduktion	255
23	Kapseln som barriär	257
23.1	Initialtillstånd	257
23.1.1	Variabler	257
23.1.2	Geometri	257
23.1.3	Strålintensitet	258
23.1.4	Temperatur	258
23.1.5	Mekaniska spänningar	259
23.1.6	Materialsammansättning	259
23.2	Kapselprocesser	259
23.2.1	Översikt av processer	259
23.2.2	Stråldämpning/värmealstring	260
23.2.3	Värmetransport	260
23.2.4	Deformation gjutjärnsinsats	260
23.2.5	Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck	262
23.2.6	Termisk expansion	263
23.2.7	Deformation från inre korrosionsprodukter	263
23.2.8	Korrosion gjutjärnsinsats	264
23.2.9	Galvanisk korrosion	264
23.2.10	Spänningskorrosion gjutjärnsinsats	265
23.2.11	Strålpåverkan	265
23.2.12	Korrosion kopparkapsel	265
23.2.13	Spänningskorrosion kopparkapsel	267
23.2.14	Korntillväxt koppar	267
23.2.15	Radionuklidtransport	267
23.2.16	Integrerade studier – skadad kapsels utveckling	267
24	Buffert	269
24.1	Buffertens initialtillstånd	271
24.1.1	Variabler	271
24.1.2	Geometri	272
24.1.3	Porgeometri	273
24.1.4	Strålintensitet	274
24.1.5	Temperatur	274
24.1.6	Vattenhalt	274
24.1.7	Gashalter	275

24.1.8	Hydrovariabler	275
24.1.9	Lastsituation	275
24.1.10	Bentonitsammansättning	275
24.1.11	Montmorillonitsammansättning	276
24.1.12	Porvattensammansättning	276
24.1.13	Konstruktionsmaterial	277
24.2	Processer i bufferten	277
24.2.1	Översikt av processer	277
24.2.2	Stråldämpning/värmealstring	278
24.2.3	Värmetransport	278
24.2.4	Frysning	280
24.2.5	Vattentransport vid omättade förhållanden	280
24.2.6	Vattentransport vid mättade förhållanden	284
24.2.7	Gastransport/gaslösning	285
24.2.8	Piping/erosion	286
24.2.9	Svällning	287
24.2.10	Termisk expansion	293
24.2.11	Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert	293
24.2.12	Advektion	297
24.2.13	Diffusion	297
24.2.14	Osmos	298
24.2.15	Jonbyte/sorption	299
24.2.16	Montmorillonitomvandling	300
24.2.17	Lösning/fällning föroreningar	302
24.2.18	Kolloidfrigörelse/erosion	303
24.2.19	Strålinducerad montmorillonitomvandling	306
24.2.20	Radiolys av porvatten	306
24.2.21	Mikrobiella processer	306
24.2.22	Radionuklidtransport – advektion	308
24.2.23	Radionuklidtransport – diffusion	308
24.2.24	Radionuklidtransport – sorption	309
24.2.25	Speciering av radionuklider	309
24.2.26	Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit	309
25	Återfyllning	311
25.1	Initialtillstånd för återfyllningen	311
25.1.1	Variabler	311
25.1.2	Geometri	311
25.1.3	Porgeometri	311
25.1.4	Strålintensitet	311
25.1.5	Temperatur	311
25.1.6	Vattenhalt	311
25.1.7	Gashalter	311
25.1.8	Hydrovariabler	311
25.1.9	Lastsituation	312
25.1.10	Återfyllningssammansättning	312
25.1.11	Montmorillonitsammansättning	312
25.1.12	Porvattensammansättning	312
25.1.13	Konstruktionsmaterial	312
25.2	Processer i återfyllningen	312
25.2.1	Översikt av processer	312
25.2.2	Integrerade studier – sammansättning och funktion	312
25.2.3	Stråldämpning/värmealstring	313
25.2.4	Värmetransport	313
25.2.5	Frysning	313
25.2.6	Vattentransport vid omättade förhållanden	314
25.2.7	Vattentransport vid mättade förhållanden	315
25.2.8	Gastransport/gaslösning	318
25.2.9	Piping/erosion	318
25.2.10	Svällning	318

25.2.11	Termisk expansion	322
25.2.12	Advektion	322
25.2.13	Diffusion	322
25.2.14	Osmos	322
25.2.15	Jonbyte/sorption	322
25.2.16	Montmorillonitomvandling	322
25.2.17	Lösning/fällning föroreningar	322
25.2.18	Kolloidfrigörelse/erosion	322
25.2.19	Strålinducerad montmorillonitomvandling	322
25.2.20	Radiolys av porvatten	322
25.2.21	Mikrobiella processer	322
25.2.22	Radionuklidtransport – advektion	322
25.2.23	Radionuklidtransport – diffusion	323
25.2.24	Radionuklidtransport – sorption	323
25.2.25	Radionuklidtransport – speciering av radionuklider	323
25.3	Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet	324
26	Geosfär	325
26.1	Initialtillstånd för geosfären	325
26.2	Processer i geosfären	325
26.2.1	Översikt av processer	325
26.2.2	Värmetransport	326
26.2.3	Grundvattenströmning	329
26.2.4	Gasströmning/gaslösning	332
26.2.5	Rörelser i intakt berg	333
26.2.6	Termisk rörelse	336
26.2.7	Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor	337
26.2.8	Sprickbildning	341
26.2.9	Tidsberoende deformationer	342
26.2.10	Erosion	343
26.2.11	Advektion/blandning – grundvattenkemi	343
26.2.12	Advektion/blandning – radionuklidtransport	344
26.2.13	Diffusion – grundvattenkemi	345
26.2.14	Diffusion – radionuklidtransport	345
26.2.15	Reaktioner med berget – grundvatten/bergmatris	346
26.2.16	Reaktioner med berget – lösning/fällning av sprickmineraler	347
26.2.17	Reaktioner med berget – sorption av radionuklider	348
26.2.18	Mikrobiella processer	349
26.2.19	Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial	351
26.2.20	Kolloidsättning – kolloider i grundvatten	352
26.2.21	Kolloidsättning – radionuklidtransport med kolloider	353
26.2.22	Gasbildning/gaslösning	354
26.2.23	Metanisomsättning	354
26.2.24	Saltutfrysning	355
26.2.25	Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling	355
26.2.26	Integrerad modellering – radionuklidtransport	357
27	Biosfär	361
27.1	Tillståndet i biosfären	361
27.2	Förståelse och konceptuella modeller	362
27.3	Modellutveckling	364
27.4	Transportprocesser	366
27.5	Terrestra ekosystem	369
27.6	Akvatiska ekosystem	373
27.7	Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt	375
27.8	Internationellt arbete samt informationsspridning	376
27.9	Redovisningen av biosfären i säkerhetsanalysen	377
27.10	Stödjande forskning för platsundersökningsprogram	379
28	Andra metoder	383
28.1	Separation och transmutation	383

28.2	Djupa borrhål	388
28.2.1	Tidigare utredningar om djupa borrhål	389
28.2.2	Djupa borrhål i andra länder	391
28.2.3	Djupa borrhål i det svenska kärnbränsleprogrammet	391

Del V Samhällsvetenskaplig forskning

29	Översikt – samhällsvetenskaplig forskning	397
30	Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter	401
31	Beslutsprocesser	405
32	Opinion och attityder – psykosociala effekter	407
33	Omvärldsförändringar	411

Del VI Loma-programmet och rivningen

34	Översikt – Loma-programmet och rivningen	417
35	Låg- och medelaktivt avfall	419
35.1	Avfallens ursprung	419
35.2	Avfallsmängder och avfallstyper	419
35.2.1	Kortlivat avfall	419
35.2.2	Långlivat avfall	420
35.2.3	Mycket lågaktivt avfall	421
35.3	Anläggningar för låg- och medelaktivt avfall	421
35.3.1	Slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall, SFR	422
35.3.2	Bergrum för avfall, BFA	425
35.3.3	Slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL	426
35.3.4	Markförvar för mycket lågaktivt avfall	426
35.4	Finansiering	427
36	Säkerhetsredovisningar	429
36.1	Föreskrifter för säkerhet och strålskydd	429
36.1.1	Föreskrifternas tillämpning på slutförvarens driftskede	429
36.1.2	Föreskrifternas tillämpning på slutförvarens förvaringsskede	429
36.2	SKB:s säkerhetsstrategi	429
36.3	Slutlig säkerhetsredovisning (SAR) för SFR 1	430
36.4	Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) för utbyggt SFR	431
36.5	Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) för SFL	432
36.6	Säkerhetsbedömning av markförvar	432
37	Forskning	433
38	Strategier för rivning	437
38.1	SKB:s huvudstrategi	437
38.2	Tidpunkt för rivning	439
38.3	Tillståndshavarnas strategier	440
38.3.1	Barsebäck	441
39	Ansvarsfördelning vid rivning	443
40	Teknik för rivning	445
40.1	Blockspecifika rivningsstudier	445
40.2	Referensstudie	445
40.2.1	Studiens förutsättningar	445
40.2.2	Driftskeden	446
40.2.3	Tekniska lösningar	447
40.2.4	Doser till rivningspersonal	449

Referenser	451
-------------------	-----

Bilaga A Kapsel för använt kärnbränsle – konstruktionsförutsättningar	481
--	-----

Bilaga B Förkortningar	493
-------------------------------	-----

Del I

SKB:s handlingsplan

- 1 Hanteringen av radioaktivt avfall
- 2 Kärnbränsleprogrammet
- 3 Loma-programmet

1 Hanteringen av radioaktivt avfall

I mer än 30 år har kraftindustrin i Sverige producerat elektricitet med hjälp av kärnkraft. Under denna tid har en stor del av det hanteringssystem, som behövs för att på ett säkert sätt ta hand om avfallet från driften av reaktorerna, byggts upp. Systemet består av mellanlagret för använt kärnbränsle (Clab) slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR) samt ett system för transporter.

För det använda bränslet återstår att bygga och driftsätta det system av anläggningar som behövs för slutförvaring. I det systemet ingår en inkapslingsanläggning för att kapsla in bränslet i kopparkapslar och ett slutförvar, där de fyllda kapslarna ska deponeras. Det kommer också att behövas en utbyggnad av SFR och ett förvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL). Vidare måste befintliga system och anläggningar (Clab, SFR, transportsystem) löpande underhållas och moderniseras bland annat med tanke på planerade förlängda drifttider för de svenska reaktorerna och därmed för kärnavfallssystemet. Denna handlingsplan redogör för SKB:s planer att realisera dessa återstående delar av hanteringssystemet på ett sådant sätt att människa och miljö inte skadas – i dag eller i framtiden.

1.1 SKB:s handlingsplan

I kapitel 1 av handlingsplanen behandlar vi vårt uppdrag och mål. Sedan ges en bild av hur långt vi hittills har kommit, vilka resurser som finns att tillgå för genomförandet samt den strategi vi valt för att nå målen. Kapitlet innehåller också en tidsplan, som kan genomföras under vissa givna förutsättningar. I kapitel 2 och 3 följer sedan planering för att genomföra programmet för att ta hand om det använda kärnbränslet respektive programmet för att ta hand om det låg- och medelaktiva avfallet. Handlingsplanen tar däremot inte upp innehållet i de ansökningar som ska lämnas in för de olika anläggningarna.

Myndigheterna har vid en rad tillfällen avgivit yttranden över SKB:s planering. I yttrandet över Fud-program 2001, efterfrågade SKI en redogörelse som tydligare klargjorde planeringen för återstoden av kärnavfallsprogrammet. Som huvudmotiv för denna begäran angav SKI att myndigheterna måste få klarlagt vilka granskningar som de ska göra under de närmaste tio åren för att utifrån detta bättre kunna planera sitt eget arbete. Detta krav återkom också i regeringens beslut om Fud-program 2001.

SKB presenterade i Fud-program 2004 /1-1/ en handlingsplan. I mars 2005 offentliggjorde SKB vissa ändringar och kompletteringar av handlingsplanen. Den reviderade handlingsplanen utgjorde enligt SKI, SSI och Kasam en god systematisk beskrivning av SKB:s tidsplaner och hur olika delar av SKB:s program beror av varandra. Myndigheterna gjorde dock bedömningen att handlingsplanen kan och bör utvecklas vidare.

För att ytterligare tydliggöra planeringen för kärnbränsleprogrammet under de kommande åren presenterade SKB ”Ansökansplan för inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle” /1-2/. Denna visar vilka milstolpar som inträffar i kärnbränsleprogrammet fram till dess att slutförvaret tagits i drift och vilken avrapportering till myndigheterna som planeras vid respektive tillfälle.

Handlingsplanen i Fud-program 2004 innehöll endast en kortfattad beskrivning av Loma-programmets planering. I regeringens yttrande över Fud-program 2004 angavs bland annat att ”SKB bör utreda vilken kortaste tid som krävs för att en tillståndsprocess för slutförvaring av rivningsavfall ska kunna påbörjas”. Denna kommentar, samt andra av regeringen och myndigheterna angivna kommentarer på Fud-program 2004, har lett till att vi i denna handlingsplan redovisar Loma-programmets tidsplaner och milstolpar på motsvarande sätt som för kärnbränsleprogrammet.

1.2 SKB:s uppdrag

Den som har tillstånd att driva ett kärnkraftverk är också ansvarig för att slutförvara det radioaktiva avfallet på ett säkert sätt. Håri ingår uppgiften att riva anläggningarna när de tjänat ut, bedriva allsidig forskning och utveckling kring slutförvaring samt att studera alternativa möjligheter. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har kärnkraftsägarnas uppdrag att ta hand om kärnavfallet på ett sådant sätt att människors hälsa och miljö skyddas såväl på kort som på lång sikt, samt att bedriva den forskning och utveckling som behövs. Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI) övervakar SKB:s arbete. Andra viktiga aktörer är Kasam (Statens råd för kärnavfallsfrågor) samt de länsstyrelser och kommuner som berörs av de olika kärntekniska anläggningarna.

Hantering av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Inriktningen för arbetet har dessutom fastställts genom en lång rad politiska beslut och uttalanden, som kan sammanfattas i följande punkter:

- Avfallet från de svenska kärnkraftverken ska slutförvaras inom landets gränser.
- Sverige ska inte slutförvara avfall från andra länder.
- Det använda bränslet ska inte upparbetas.

De grundläggande riktlinjerna och rollfördelningen när det gäller hantering av kärnavfall från kärnkraftsproduktion ligger fast sedan länge. Kärnavfall som produceras i Sverige ska också tas om hand här. Det är SKB:s ansvar att planera och genomföra de olika steg som hanteringen innebär och att beräkna kostnaderna för den. I beräkningarna ingår också kostnaderna för att riva kärnkraftverken. Reaktorinnehavarna genomför sedan själva rivningen.

SKB ansvarar för anläggningarna fram till dess de har förslutits. Det har dock tidigare funnits en viss oklarhet om vem som ansvarar för slutförvaret för använt kärnbränsle från den tidpunkt då förvaret förslutits. I yttrandet över Fud-program 2004 pekade regeringen på den oro som de berörda kommunerna, Oskarshamn och Östhammar, uttryckte angående detta. SKI gavs därför i uppdrag av regeringen att i samråd med SSI lämna förslag till hur kärntekniklagen kan förtydligas i detta avseende. SKI och SSI lämnar i en rapport /1-3/ ett förslag om ändring i lagen som markerar statens sistahandsansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle.

1.3 SKB:s utgångsläge

Det svenska systemet är resultatet av drygt 30 års kontinuerligt arbete. Löpande fondering av medel i Kärnavfallsfonden har gett en stabil finansiering, utan motsvarighet inom andra industribranscher, se avsnitt 1.3.5. Administrativt har arbetet successivt funnit sina former och vilar nu på ett ändamålsenligt regelverk med en tydlig rollfördelning på såväl nationell nivå som i de berörda kommunerna.

1.3.1 SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration

Vart tredje år ska SKB lämna in ett program för forskning, utveckling och demonstration – ett så kallat Fud-program – till myndigheterna. Lagen om kärnteknisk verksamhet reglerar programmets periodicitet och omfattning. Fud-programmen granskas av myndigheterna efter en omfattande remissbehandling. Regeringen fattar sedan beslut om programmet ska godkännas. Fud-programmets fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s verksamhet har legat. En stor del av Fud-verksamheten bedrivs i våra laboratorier i Oskarshamn: Äspölaboratoriet, Bentonitlaboratoriet och Kapsellaboratoriet, se avsnitt 1.3.3.

Utvecklingen av KBS-3-metoden och de tillhörande systemen för tillverkning och kontroll av barriärerna har pågått sedan slutet av 1970-talet. Metoden redovisades första gången i en rapport /1-4/ som underlag för beslutet om att ta de senast byggda kärnkraftsreaktorerna i drift. KBS-3-metoden har sedan dess legat till grund för SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration.

Nedan ges en kort sammanfattning av de Fud-program som SKB presenterat. Samtliga nedan beskrivna program har remissbehandlats och därefter godtagits av regeringen.

FoU-program 84

Som en bilaga till ansökningarna om laddningstillstånd för reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 lämnade SKB in ett forskningsprogram som framför allt anknöt till KBS-3-metoden. Den detaljerade förvarsutformningen och platsvalet krävde mer forskning och utveckling. Myndigheterna yttrade sig över programmet och godtog det med en del detaljanmärkingar.

FoU-program 86

År 1986 lämnade vi in det första fullständiga forskningsprogrammet enligt den nya kärntekniklagen /1-5/. I enlighet med kärntekniklagens krav pekade SKB på vikten av alternativstudier, och gick i en underlagsrapport till FoU-program 86 igenom övriga metoder som kunde ses som alternativ till KBS-3-metoden /1-6/.

SKB inledde 1977 forskningsverksamhet vid Stripa gruva i Västmanland. På grund av att vattenförhållandena påverkades av att gruvan varit i drift sedan medeltiden planerade man nu att avsluta forskningen där. I stället föreslog SKB att ett nytt berglaboratorium skulle byggas i ostört berg för att göra det möjligt att även i fortsättningen fortsätta studera bergets geologiska och hydrogeologiska egenskaper samt nuklidtransport i verklig skala.

FoU-program 89

KBS-3-metoden har accepterats av myndigheter och regering som godtagbar vad gäller säkerhet och strålskydd. Den är därför ett referensalternativ för fortsatta studier av andra intressanta alternativ. I programmet /1-7/ informerade SKB om planerna på en säkerhetsanalys, SKB 91. Anledningen var behovet av att utvärdera vad variationer i geologiska förhållandena betyder för slutförvarets funktion och säkerhet. Förundersökningar för att lokalisera ett berglaboratorium till Simpevarpsområdet genomfördes och visade att det fanns förutsättningar för en sådan anläggning på Äspö, norr om Simpevarp. I beslutet angående FoU-program 89 fann regeringen bland annat att forskningsarbetet borde omfatta en redovisning och en uppföljning av alternativa hanterings- och förvaringsmetoder. Någon bindning till metod borde inte ske förrän säkerhets- och strålskyddsaspekter kunde överblickas. En utgångspunkt för den fortsatta FoU-verksamheten borde vara att ett slutförvar för kärnavfall och använt kärnbränsle skulle kunna tas i drift stegvis.

Fud-program 92

Programmet /1-8/ utgjorde starten för lokaliseringen av ett slutförvar. Statens kärnbränslenämnds förslag att förvaret ska byggas stegvis tas upp, enligt regeringens önskemål, och förs in i programmet. I ett första steg planerades demonstrationsdeponering för cirka 400 kapslar, det vill säga ungefär tio procent av det totala behovet. Först efter att detta steg genomförts och utvärderats ska beslut fattas om fortsättningen. Det blir då möjligt både att fortsätta på den inslagna linjen och att återta bränslet. I programmet presenterades för första gången planen att bygga en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab. Viktiga underlag till programmet var säkerhetsanalysen SKB 91 /1-9/ och den så kallade Pass-rapporten /1-10/, som jämför olika inkapslingsmetoder och slutförvaringsmetoder (KBS-3, djupa borrhål, långa tunnlar, medellånga tunnlar). Pass-rapporten förordar bibehållit referenssystem enligt KBS-3 med en kopparkapsel med insats av stål. I regeringens beslut ställdes krav på en kompletterande redovisning till SKI. SKB skulle komplettera Fud-program 92 genom att redovisa:

- de kriterier och metoder som kan bilda underlag för val av platser lämpliga för slutförvar,
- ett program för beskrivning av förutsättningar för konstruktion av inkapslingsstation och slutförvar,
- ett program för de säkerhetsanalyser som SKB avser att upprätta,
- en analys av på vilket sätt olika åtgärder och beslut påverkar senare beslut inom slutförvarsprogrammet.

Komplettering av Fud-program 92

SKB lämnade den begärda kompletteringen i augusti 1994 /1-11/. I sitt följande beslut klargjorde regeringen att en ansökan om ett slutförvar borde innehålla jämförande bedömningar baserade på platsanknutna förstudier på mellan fem till tio platser i landet och att platsundersökningar skulle ha bedrivits på minst två platser. Skälen för valet av dessa platser skulle redovisas. De lokaliseringsfaktorer och kriterier som SKB angav borde enligt regeringens uppfattning vara en utgångspunkt för det fortsatta lokaliseringsarbetet.

Fud-program 95

Tonvikten i Fud-program 95 /1-12/ låg på hur SKB planerar att genomföra de utvecklingsprojekt (inkapsling, slutförvar) som krävs för att inleda deponering av inkapslat bränsle. Programmet omfattade även de stödjande forsknings- och utvecklingsinsatser som behövs för projekten samt en uppföljning av och forskning om alternativa metoder. Viktiga underlag för programmet utgjorde bland annat följande:

- Redovisningarna av förstudierna i Storuman och Malå.
- En rikstäckande genomgång av förutsättningar och bakgrund för lokaliseringsarbetet – Översiktsstudie 95.
- En mall för säkerhetsrapporter, SR 95.

Vid granskningen av Fud-program 95 menade SKI att avsevärda framsteg har gjorts sedan Fud-program 92. Nyutvecklad metodik behövde nu tillämpas och utvärderas. Tidigare bedömningar av viktiga säkerhetsfaktorer måste stämmas av mot ny kunskap och modifieringar av förvarssystemet. Vidare betonade SKI att, som grund för kommande ställningstaganden om det slutliga valet av systemlösning, särskilt nollalternativet borde redovisas som referens till deponeringsalternativet.

Fud-program 98

SKB redovisade ett ingående underlag på de punkter som regeringen hade lyft fram med anledning av Fud 95, det vill säga alternativa lösningar till KBS-3, systemanalys av hela slutförvarssystemet, lokaliseringsunderlag och platsvalskriterier /1-13/. Beträffande alternativa lösningar innehåller rapporten en bred redovisning av såväl alternativa metoder som varianter av KBS-3-metoden. Slutförvarets långsiktiga säkerhet behandlades och en kommande redovisning av en säkerhetsanalys (SR 97) aviserades. SKB redovisade också det arbete som planeras inför kommande platsundersökningar fram till beslut år 2001. I programmet specificerades också referenskapseln med ett fem centimeter tjockt kopparhölje och gjutjärnsinsats. Regeringen begärde i sitt beslut om Fud-program 98 att SKB skulle lämna en kompletterande redovisning beträffande alternativa metoder, underlag för val av platser och program för platsundersökningarna.

Komplettering Fud-program 98

I november 1999 redovisade SKB den aviserade säkerhetsanalysen, SR 97 /1-14/, som i remissbehandlingen mottogs mycket positivt av såväl myndigheter som den vetenskapliga expertisen. Myndigheterna ansåg att KBS-3-metoden var en god grund för SKB:s kommande platsundersökningar och den fortsatta utvecklingen av barriärerna. I december 2000 lämnade SKB de kompletterande redovisningar som regeringen begärde i sitt beslut över Fud-program 98 /1-15/. SKB föreslog att platsundersökningarna skulle genomföras i Oskarshamn och i Norduppland och att dessa skulle inledas under år 2002.

Fud-program 2001

Fud-program 2001 koncentrerade sig på frågor som relaterar till säkerhetsanalysen och dess behov av forskning och teknikutveckling /1-16/. Frågor som rör lokalisering av anläggningarna togs inte upp, eftersom SKB vid denna tid väntade på regeringens beslut med anledning av kompletteringen av Fud-program 98. I programmet utgick man från myndigheternas krav på den långsiktiga säkerheten och kopplade detta till dels utvecklingen av metodik för säkerhetsanalysen, dels till forskningen om de långsiktiga processerna i förvaret. Programmen för säkerhetsanalys och

forskning länkades sedan ihop med programmen för utveckling av metoder och instrument inför platsundersökningarna och utformningen av slutförvaret, inkapslingsanläggningen och kapseln. Ett övergripande mål för SKB var att starta den inledande driften av ett slutförvar för använt bränsle år 2015. Tidsplanen innebär att reguljär drift (nuvarande benämning rutinmässig drift) kan inledas i början av 2020-talet innan förvaringsutrymmena i Clab är fyllda. På så sätt undviks en ytterligare utbyggnad. Inkapslingsanläggningen ska enligt planerna stå driftklar ett år före slutförvaret. I tidsplanen ingick även att genomföra säkerhetsanalyser av slutförvaret, baserade på data från platsundersökningsskedet. Dessa analyser ska ge underlag för platsvalet. I sitt yttrande över Fud-program 2001 efterfrågade SKI och SSI en redogörelse som tydligare klargör planeringen för återstoden av kärnavfallsprogrammet /1-17/. Regeringen begärde sedan en handlingsplan i samband med att forskningsprogrammet godkändes.

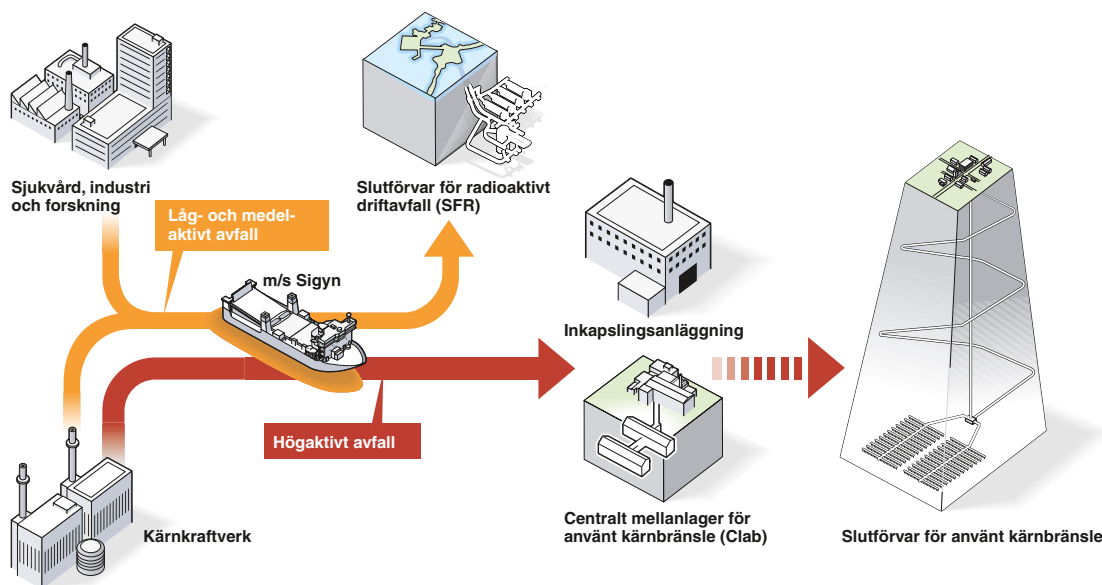
Fud-program 2004

Detta Fud-program var främst inriktat på att belysa utvecklingen av tillverkning och förslutning av kapslar för slutförvaring av använt bränsle /1-1/. Anledningen var att SKB skulle lämna in en ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen för en inkapslingsanläggning under den kommande programperioden.

I Fud-program 2004 presenterade vi den handlingsplan som efterlystes i granskningen av Fud-program 2001. Planen delades in i två delar: kärnbränslesystemet respektive avfallssystemet för låg- och medelaktivt avfall (Loma). För den aktuella programperioden 2004–2009 låg tyngdpunkten i arbetet på kärnbränsleprogrammet. Planen innebar bland annat att SKB tar fram det underlag som behövdes för att kunna lämna in ansökningarna om inkapslingsanläggningen och slutförvaret. SKI skrev i sitt yttrande över Fud-program 2004 /1-18/ att de ansåg att SKB:s handlingsplan var ofullständig och behövde struktureras bättre. SKI efterfrågade en mer detaljerad redovisning av innehållet i de beslutsunderlag som SKB avsåg att lämna vid olika redovisningstillfällen.

1.3.2 Befintliga anläggningar

Sedan flera år driver SKB ett slutförvar för låg- och medelaktivt avfall (SFR), ett mellanlager för använt kärnbränsle (Clab) och ett system för att transportera kärnavfallet mellan de olika anläggningarna, se figur 1-1. SFR ligger i närheten av Forsmarks kärnkraftverk och togs i drift 1988. Clab ligger vid Oskarshamns kärnkraftverk och togs i drift 1985.



Figur 1-1. Systemet för att ta hand om radioaktivt driftavfall och använt kärnbränsle.

Slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1)

För det kortlivade låg- och medelaktiva driftavfallet från kärnkraftverken och behandlingsanläggningar finns ett slutförvar för radioaktivt driftavfall. Denna del benämns i dag SFR 1, se figur 1-2. Anläggningen ligger på 50 meters djup under havsbotten.

Förvarsutrymmena i den befintliga delen – SFR 1 – utgörs i dag av fyra 160 meter långa bergrum i olika utförande och ett 70 meter högt bergrum där en betongsilo byggts. I ett av de fyra bergrummen förvaras lågaktivt avfall inneslutet i vanliga ISO-containrar. Bergrummet kallas BLA (bergrum för lågaktivt avfall). Avfallet i denna del av anläggningen kan hanteras utan någon särskild form av strålskärning. Tre av bergrummen tar emot avfall som kräver strålskärning, BMA (bergrum för medelaktivt avfall) samt BTF 1 och 2 (betongtankförvar). Betongsilon är även den avsedd för medelaktivt avfall, främst filter och jonbytarmassor som används vid rening av reaktorvatten. Vid årsskiftet 2006/2007 hade 31 100 m³ avfall deponerats i SFR 1. Den totala deponeringsvolymen i SFR 1 uppgår till 63 000 m³. Den enskilt största faktorn som styr mängderna driftavfall är hur länge kärnkraftverken är i drift. Forsmark och Ringhals planerar att driva sina reaktorer i 50 år och OKG har beslutat om en drifttid på 60 år. Ursprungligen var den beräknade drifttiden kortare – 25 år – eftersom all kärnkraft skulle vara avställd till år 2010. Ökad livslängd för reaktorerna medför i teorin större mängder driftavfall som måste slutförvaras. Samtidigt utvecklas dock avfallshanteringen. Det avfall som nu produceras är till volymen mindre, men har högre koncentration av radioaktiva ämnen än vad prognoserna ursprungligen utgick ifrån. Även med drifttider upp mot 60 år kommer de totala avfallsvolymererna från driften i praktiken inte att bli större än de som ursprungligen beräknades för 25 års drift.

Volymerna av kortlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att öka vid större ombyggnader och när kärnkraftverken slutligen rivs. SKB bedömer att en utbyggnad av SFR är den bästa lösningen för att ta hand om dessa ökade mängder kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Utbyggnaden beskrivs i avsnitt 1.4.2, där också benämningen av förvarets olika delar beskrivs.

Centralt mellanlager för använt bränsle (Clab)

Det använda kärnbränslet mellanlagras i vattenbassänger i ett centralt mellanlager (Clab) vid kärnkraftverket i Oskarshamn, se figur 1-3. Clab består av en mottagningsdel i marknivå, där transportbehållarna med det använda bränslet tas emot och bränslet lastas ur under vatten.



Figur 1-2. Interiör från slutförvaret för låg- och medelaktivt driftavfall.



Figur 1-3. Det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle.

Själva lagringsutrymmet består av två bergtrum med taket 25–30 meter under markytan. Varje bergtrum är ungefär 120 meter långt och innehåller fyra lagringsbassänger och en reservbassäng. Vattnet i bassängerna tjänar både som strålskärm och som kylmedel. Bränslets överkant står åtta meter under vattenytan. Vid bassängkanten är strålningsnivån så låg att personalen kan vistas där utan tidsbegränsning.

Vid årsskiftet 2006/2007 fanns 4 775 ton bränsle (räknat som ursprunglig mängd uran) i anläggningen. Den totala lagringskapaciteten är 8 000 ton bränsle, fördelade på 5 000 ton i de ursprungliga bassängerna och 3 000 ton i de nya.

Transportsystemet

I Sverige sker transporter av kärnavfall till sjöss, eftersom samtliga kärnkraftverk och kärnavfallsanläggningar ligger vid kusten. Transportsystemet består av det specialbyggda fartyget m/s Sigyn, ett antal transportbehållare och specialfordon för lastning och lossning. Systemet har successivt byggts ut och kompletterats sedan driften startade 1982. Normalt gör Sigyn mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken och Clab, respektive SFR. Fartyget hyrs också ut för andra tunga transporter.

Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärning. Det kan därför transporteras i vanliga containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärning och gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Därefter transporteras avfallet i transportbehållare med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt det är, se figur 1-4. Det använda bränslet transporteras i behållare med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar, se figur 1-5. Dessa behållare är också försedda med kylflansar för att kyla bort bränslets resteffekt.

Transportsystemets uppgift i samband med inkapsling och deponering är att förflytta de förslutna kapslarna från inkapslingsanläggningen till slutförvaret. Detta ska ske på ett säkert och miljövänligt sätt så att skador inte uppkommer, vare sig på kapslarna eller i omgivningen. För detta ändamål kommer vi att ta fram en ny typ av transportbehållare.



Figur 1-4. Locket på en ATB transportbehållare för radioaktivt avfall lyfts av.



Figur 1-5. Transportbehållare för använt kärnbränsle.

1.3.3 Resurser för forskning, utveckling och demonstration

Forskning och utveckling för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle behöver i många delar utföras i realistisk miljö. SKB har numera tre laboratorier där vi kan utföra forsknings- och utvecklingsprojekt i full skala för alla slutförvarets tre barriärer. Förutom Äspölaboratoriet och Kapsellaboratoriet, som varit i drift länge, invigdes även Bentonitlaboratoriet i mars 2007. Bentonitlaboratoriet är organisatoriskt en del av Äspölaboratoriet. Resultaten från experimenten och projekten i de tre laboratorierna ger underlag till att utforma slutförvaret och inkapslingsanläggningen samt till de säkerhetsanalyser som ska genomföras. Vi har även möjlighet att på olika sätt utnyttja resultat från motsvarande typer av laboratorier i andra länder.

Kapsellaboratoriet

Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. En av de gamla svetshallarna, som användes till fartygstillverkning, har byggts om för att passa till utveckling av förslutningsteknik för kopparkapslarna. I första hand är det utrustning för svetsning av kopparlock och -bottnar samt utrustning för oförstörande provning av svetsarna och kapselns olika delar som utvecklas där. Även utrustning och system för att hantera bränsle och kapslar i den framtida inkapslingsanläggningen testas och utvecklas i Kapsellaboratoriet. Verksamheten syftar också till att utbilda personal inför driftsättningen av inkapslingsanläggningen. Kapsellaboratoriet ska därför enligt planerna vara i bruk fram till dess att inkapslingsanläggningen tas i drift.

I Kapsellaboratoriet finns stationer för att testa olika svetstekniker och olika metoder för oförstörande provning. Målet är att utveckla metoder som uppfyller fastställda kvalitetskrav och som har tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i inkapslingsanläggningen. De viktigaste utrustningarna som finns i laboratoriet är friktionssvets, elektronstrålesvets, röntgen och ultraljud. En interiörbild från Kapsellaboratoriet visas i figur 1-6.



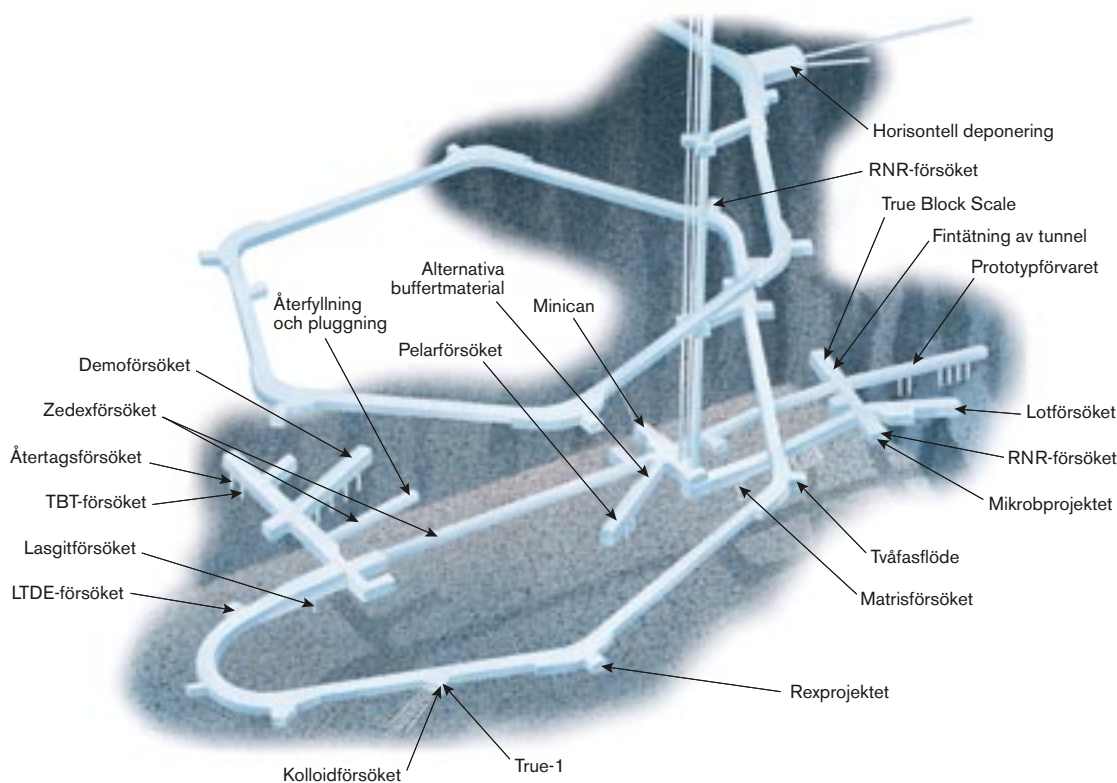
Figur 1-6. Interiör från Kapsellaboratoriet.

Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet, som anlades under perioden 1990–1995, är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk. Syftet med anläggningen är att undersöka hur slutförvarets barriärer och delar (kapseln, bufferten, återfyllning, förslutning och berget) hindrar de radioaktiva ämnena i bränslet från att nå markytan. Laboratoriet är en vidareutveckling av det arbete som tidigare bedrevs i Stripa gruva i Bergslagen. Äspölaboratoriets roll har under senare år förskjutits från att undersöka barriärernas funktion till att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva slutförvaret. Anläggningen kommer i framtiden också att användas för att utbilda och träna den personal som ska arbeta i slutförvaret. Vi räknar därför med att laboratoriet kommer att vara i drift under en lång tid framöver.

Det underjordiska laboratoriet består av en tunnel från Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö. På Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. De olika försöken äger rum i grenar och nischer i huvudtunneln. Figur 1-7 visar exempel på avslutade och pågående försök. Laboratoriets ovanjordsanläggning ligger på Äspö.

Flera olika länder deltar i de försök som görs på Äspölaboratoriet. SKB samarbetar med en rad länder och organisationer som arbetar med kärnavfallsfrågor. I olika former och projektgrupper arbetar vi tillsammans med systerorganisationer, forskningsinstitut och universitet i bland annat Finland, Frankrike, Japan, Kanada Schweiz, Spanien, Tjeckien och Tyskland. De internationella kontakterna är viktiga för att jämföra olika metoder för beräkningar och analyser samt för att få en grundligare diskussion och värdering av resultaten. Samarbetet betyder också att resurserna kan utnyttjas bättre. Det ger oss också möjlighet att anlita de främsta experterna inom olika områden.



Figur 1-7. Exempel på avslutade och pågående försök i Äspölaboratoriet.

Bentonitlaboratoriet

Att gå från försök i liten skala i laboratorium och olika prototyp tester till produktion i industriell skala kräver stegvis utveckling av produktions- och kontrollmetoder som går att upprepa med tillräckligt hög kvalitet.

Nu har SKB tagit samma steg som för kapseln när det gäller bufferten och i mars 2007 invigdes ytterligare ett laboratorium i Oskarshamn – Bentonitlaboratoriet – se figur 1-8. Anläggningen är belägen i anslutning till Äspölaboratoriet och ska komplettera de försök som redan görs här. Vi vill också utveckla metoder för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnlarna.

Fördelen med Bentonitlaboratoriet är att det finns möjligheter att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt.

1.3.4 Resurser i form av kompetens och organisation

SKB har i dag ett ledningssystem som är certifierat enligt kvalitetslednings- och miljöledningsstandarderna ISO 9001 och ISO 14001. I januari 2007 övertog SKB driften av Clab i egen regi. I samband med detta införde SKB ett nytt ledningssystem med rutiner som krävs för att driva kärnteknisk verksamhet. Detta nya ledningssystem lever upp till alla relevanta krav i SSI:s och SKI:s föreskrifter och kommer att utgöra en viktig bas för den organisation som SKB behöver för att bygga de planerade anläggningarna.



Figur 1-8. Bentonitlaboratoriet invigdes i mars 2007 och verksamheten har precis kommit igång.

I samband med övertagandet av Clab bildades en ny avdelning för kärnteknisk säkerhet. Avdelningen har en fristående roll inom SKB med ansvar för att dels granska verksamheten (fristående granskning enligt kärnteknisk lagstiftning) samt för utveckling inom säkerhets- och strålskyddsområdet.

SKIFS 2004:1 och miljöbalken ställer krav på kunskap som innebär att verksamhetsutövare ska skaffa den kunskap som behövs för att upprätthålla säkerheten samt för att undvika att verksamheten orsakar skador på hälsa och miljö, samt kunskap om hur sådana skador ska förebyggas eller begränsas.

Under 2005–2006 genomförde SKB en studie om hur den framtida organisationen bör se ut under åren efter det att ansökan för slutförvaret lämnas in. Denna studie belyser ett antal olika scenarier som bland annat berör lokaliseringen av slutförvaret, tidsaspekter omkring tillståndsprocessen etc. Studien föreslår också alternativa organisationsförslag samt pekar på vilken kompetens som SKB kommer att behöva i de olika skedena av verksamheten. Slutsatsen var att SKB bör bedriva sin verksamhet inom ramen för två olika program – Kärnbränsleprogrammet och Programmet för låg- och medelaktivt avfall (Loma-programmet). Driften av de befintliga anläggningarna (Clab, SFR och transportsystemet) sker inom ramen för driftprocessen. Samordning av programmen är viktiga ur flera aspekter. Den långsiktiga planeringen måste förutom lagkrav också ta hänsyn till resurser i form av kompetens och tillgång på entreprenörer. En väl samordnad planering av programmen är en förutsättning för att utnyttja resurser på ett effektivt sätt.

I början av 2007 började en andra fas av organisationsstudien. Syftet är att utarbeta detaljerade förslag till hur SKB:s verksamhet kan struktureras och styras under tiden fram till dess att slutförvaret och inkapslingsanläggningen ska tas i drift.

1.3.5 Finansiella resurser

De företag som innehar kärnkraftverk är ansvariga för att omhänderta och slutförvara använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från kraftverken, samt för att senare riva dessa. På uppdrag av kärnkraftföretagen upprättar SKB en kostnadsberäkning och på basis av denna lämnar sedan SKI förslag på avgifter och säkerheter. Avgiftens och säkerheternas storlek beslutas av regeringen. Medlen går in i en fond som är placerad på räntebärande konto i Riksgäldskontoret eller i skuldförbindelser utfärdade av staten. Fonden förvaltas av en separat myndighet, Kärnavfallsfonden. För innevarande år är avgiften i genomsnitt cirka 1,3 öre/kWh. Vid årsskiftet 2006/2007 var marknadsvärdet i fonden cirka 38 miljarder kronor.

Den totala kostnaden för systemet beräknas utifrån en antagen drifttid av reaktorerna i Forsmark och Ringhals av 50 år och i Oskarshamn av 60 år (reaktorerna Barsebäck 1 och 2 ställdes av 1999-11-30 respektive 2005-05-31).

Kostnaden i 2007 års penningvärde¹ för att ta hand om allt radioaktivt avfall från 50 respektive 60 års drift av reaktorerna samt för att riva dem är beräknat till totalt cirka 94 miljarder kronor. Av detta har redan cirka 27 miljarder kronor använts för att bygga och driva de befintliga anläggningarna samt för forskning och utveckling. De framtida kostnaderna från och med 2008 är cirka 67 miljarder kronor.

I maj 2006 antog riksdagen en ny finansieringslag och senare, i maj 2007, utfärdade regeringen en förordning baserad på den nya lagen. Detta nya regelverk innebär vissa förändringar i underlaget till Plankalkylen och redovisningen av densamma. Bland annat har den så kallade intjänandetiden förlängts från 25 år till 40 år. Avgiften, såsom det är föreskrivet i finansieringslagen med tillhörande förordning, baseras på den avfallsmängd som föreligger vid en drifttid av 40 år dock med minst sex års resterande drifttid för verk i drift (intjänandetiden). Detta innebär att fonderingsbehovet blivit större på grund av den ökande mängden restprodukter att omhänderta men samtidigt har den elproduktion som avgiften ska slås ut på ökat. En annan viktig förändring jämfört med det tidigare systemet är att skyldigheten att betala avgifter kvarstår efter det att en reaktor permanent ställts av. Detta gäller för närvarande för reaktorerna i Barsebäck.

¹ Den senaste Plankalkylen är upprättad i prisnivå januari 2007 och avser enbart framtida kostnader från och med 2008. Den totala kostnaden erhålls genom att nedlagda kostnader räknas upp till samma prisnivå samt adderas till Plankalkylens totalkostnad.

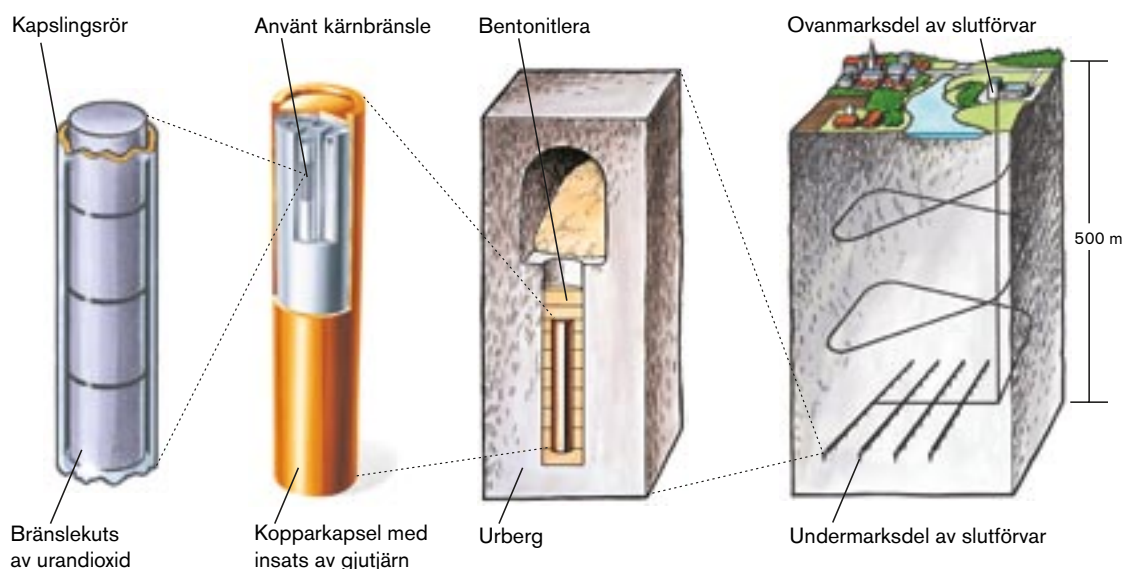
I det nya systemet tas avgiften ut på den el som produceras i kärnkraftverken för de reaktorer som är i drift. För permanent avställda reaktorer tas en avgift ut på årsbasis. Som underlag för att bestämma avgiften sammanställer SKB periodvis en beräkning av kostnaderna för de åtgärder som behövs. Årets beräkning redovisas i en rapport, Plan 2007, som överlämnades till Statens kärnkraftinspektion, SKI, den 29 juni 2007. Redovisningen ska utgöra underlag för avgifter och säkerheter för åren 2008 och 2009.

1.4 SKB:s strategi

Detta avsnitt behandlar de strategiska val beträffande metod och arbetsgång som SKB måste göra för att bygga och ta i drift de återstående anläggningarna.

SKB anser att det är de generationer som har dragit nytta av kärnkraftverkens elproduktion som också ska se till att avfallsfrågan får en lösning. I dag finns teknik, finansiering och den politiska viljan att nå en lösning. Därför bör de olika förvararna byggas så snart som de behövs. Valet av lämpliga platser för förvararna bör ske i steg genom en öppen demokratisk process i samförstånd med myndigheter och de berörda kommunerna.

Utvecklingen av KBS-3-metoden, se figur 1-9, befinner sig i ett skede där tester och demonstrationer av de olika systemdelarna i pilot- och full skala dominerar. Kapsellaboratoriet, Bentonitlaboratoriet och Äspölaboratoriet är de centrala resurserna för detta. Efter flera års utveckling av svetsmetoder kunde vi välja friction stir welding som referensmetod för att försluta kapslar i inkapslingsanläggningen. Samtidigt har vi skaffat oss kunskap om svensk berggrund, vilka egenskaper berget måste ha samt hur de tekniska barriärerna i slutförvaret för använt kärnbränsle ska utformas för att klara de krav som finns. När det gäller metoder och teknik för att bygga slutförvaret för använt kärnbränsle, deponera kopparkapslar och bentonit samt för att återfylla tunnlar har dessa samtliga utprovats i full skala. Metodiken för att analysera den långsiktiga säkerheten är även den väl utvecklad och testad. Vi bedömer därför att KBS-3-metoden uppfyller både lagkrav och tekniska krav på säkerhet.



Figur 1-9. Vid KBS-3-metoden kapslas det använda kärnbränslet in i kopparkapslar och deponeras på cirka 500 meters djup i urberget. Runt kopparkapslarna finns en buffert av bentonitlera som ska skydda mot korrosion och rörelser i berget.

1.4.1 Strategiska metodval för att slutförvara använt kärnbränsle

Internationellt finns två huvudstrategier för att hantera det använda bränslet – upparbetning och direktdeponering. Valet mellan dessa styrs av om ett land väljer att betrakta bränslet som ett avfall eller som en resurs. I flera länder ses upparbetning som en nödvändighet för att på ett uthålligt sätt kunna hushålla med de uranresurser som finns. Andra länder har, av politiska eller ekonomiska skäl, valt att betrakta bränslet som ett avfall. Oavsett om avfallet består av använt bränsle eller har separerats i en upparbetningsanläggning uppkommer avfall som måste deponeras i någon form av geologisk formation. Genom system av barriärer hindras de radioaktiva ämnena sedan från att nå biosfären.

Idén om geologisk deponering fanns redan på 1950-talet. Andra mer eller mindre realistiska strategier som att till exempel skjuta upp bränslet i rymden, deponera det i världshavens djuphavsbotten eller begrava det i inlandsisen har också studerats. Ett stort antal länder är i dag överens om att geologisk deponering är den enda lösning som uppfyller alla krav på en säker slutförvaring och att den kan genomföras genom att anpassa tillgänglig teknik.

Principerna bakom SKB:s säkerhetsfilosofi för geologisk deponering är följande:

- Förvaret ska förläggas till en långsiktig stabil geologisk miljö som är skyddad från såväl samhällsförändringar som långsiktiga klimatförändringar.
- Förvaret ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för framtida generationer.
- Det använda bränslet ska i förvaret omges med flera barriärer. Barriärerna ska i första hand isolera bränslet.
- Om isoleringen skulle skadas ska barriärerna fördröja en eventuell spridning av radionuklider.
- Tekniska barriärer ska bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Förvaret ska utformas så att höga temperaturer undviks.
- Barriärerna ska fungera passivt, det vill säga utan ingripande av människan och utan tillförsel av energi eller material.

Tillsammans med en rad andra överväganden, som till exempel att förvaret rent tekniskt ska vara möjligt att konstruera, har dessa principer lett fram till KBS-3-systemet för använt kärnbränsle.

Valet av KBS-3-metoden som referensutformning i det svenska kärnbränsleprogrammet har skett stegvis inom ramen för redovisning och granskning av Fud-programmen, se avsnitt 1.3.1 och studier relaterade till dem /1-19, 1-20, 1-21, 1-22, 1-23 och 1-24/.

Under år 2000 genomförde SKB en jämförande systemanalys /1-25/. Analysen utvärderar olika strategier för att ta hand om använt kärnbränsle. Som underlag används de tidigare studierna. De olika strategier och metoder som studerats under åren jämförs med de krav som ställs. Analysen beaktar såväl övergripande och samhälleliga krav som miljö-, säkerhets- och strålskyddskrav. Metoder som studerats och jämförts med KBS-3 när det gäller förvar i kristallint berg är mycket långa tunnlar, WP-Cave och djupa borrhål.

I en samlad utvärdering mot kraven bedömdes KBS-3 vara den mest fördelaktiga metoden. Den senaste säkerhetsanalysen baserad på data från de platsundersökningar som vi genomfört /1-26/ visar att ett KBS-3-förvar har förutsättningar att klara myndigheternas krav. Ett argument som speciellt talar för KBS-3-metoden är att hanteringen i driftskedet sker på ett sådant sätt att det är möjligt att ha individuell kontroll över såväl kapslar som buffert. Förvaret går också enklare att anpassa till förhållandena på en speciell plats än vad andra metoder gör.

1.4.2 Strategier för låg- och medelaktivt avfall

Det nuvarande slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1) är enbart licensierat för att ta emot avfall från driften av kärnkraftsreaktorerna. Effekthöjningar, ombyggnader och ökade drifttider för reaktorerna kommer att påverka behovet av utrymme. Då mängden avfall kommer att öka i samband

med rivning av kärnkraftsreaktorerna hade SKB ursprungligen planerat att bygga ut förvaret och kalla den nya delen för slutförvar för rivningsavfall (SFR 3). Denna del skulle då licensieras för att ta emot även rivningsavfall.

SKB:s nuvarande huvudstrategi och planering för att ta om hand radioaktivt rivningsavfall innebär att vi kommer att kunna börja att ta emot rivningsavfall från Barsebäck år 2020. En förutsättning för att detta ska bli möjligt är att det nuvarande slutförvaret byggs ut. Huvudstrategin innebär att SFR byggs ut i två etapper. I samband med utbyggnaden kommer hela SFR att licensieras om för att kunna ta emot både drift- och rivningsavfall. Efter utbyggnaden kommer begreppen SFR 1 och SFR 3 att avskaffas, och anläggningen kommer att benämnas enbart SFR. Den första etappen ska rymma det radioaktiva rivningsavfallet från Barsebäck 1 och 2, den ökade mängden driftavfall som uppkommer på grund av en förlängd drifttid av nuvarande reaktorer, samt udda stora komponenter från effekthöjningsprojekten. En andra etapp kommer att byggas för att rymma rivningsavfallet från reaktorer som är i drift i dag. När utbyggnaden av etapp två ska stå klar är ännu inte beslutat.

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet mellanlagras i dag i förvaringskassetter i bassängerna i Clab, alternativt i kärnkraftverkens bassänger. SKB och de svenska kärnkraftbolagen anser att ett utrymme för torr mellanlagring av hårdkomponenter behövs som komplement eller ersättning till våt mellanlagring i Clab. Mellanlagringen i Clab är dyr och utrymmeskrävande och kan på längre sikt orsaka utrymmesbrist i Clab för använt kärnbränsle. Hårdkomponenterna är i behov av strålskärning, men inte av kylning. Förberedelser pågår vilket innebär att långlivat låg- och medelaktivt avfall från samtliga kärnkraftverk ska torrlagras i BFA (bergrum för avfall) i Simpevarp. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring. En ny avfallstransportbehållare, ATB-1T, som passar formatet på de ställådor som hårdkomponenterna ska transporteras och mellanlagras i, projekteras. Leverans av ATB-1T är planerad till 2011, varvid torr mellanlagring från andra kraftverk än Oskarshamn kan påbörjas. I den torra förvaringen ingår tills vidare inte styrstavar och utrustning som innehåller klyvbart material, utan detta lagras även fortsättningsvis i Clab. Mellanlagringen ska pågå till dess att slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall driftsätts.

Den sista anläggningen som kommer att byggas inom Loma-programmet är slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall behöver inte stå färdigt förrän merparten av de svenska kärnkraftverken rivs, det vill säga tidigast år 2045.

1.4.3 Lokalisering

Lokaliseringen av de återstående anläggningarna i systemet bygger på en stegvis process med väl underbyggda och förankrade beslut. I slutet av 2006 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen till myndigheterna. För närvarande pågår utvärderingen av platsundersökningarna, som genomförs i Forsmark och Laxemar för ett slutförvar för använt kärnbränsle. Med utgångspunkt från bland annat dessa avser vi att i mitten av 2009 välja en av dessa platser. I slutet av samma år kommer vi enligt planerna att lämna in en ansökan enligt kärntekniklagen för att bygga slutförvaret och en ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet.

1.4.4 Tillkommande anläggningar

För att ta hand om och slutförvara det använda kärnbränslet behövs nya anläggningar, i första hand en inkapslingsanläggning för att kapsla in det använda bränslet i kopparkapslar samt ett slutförvar där kapslarna deponeras. Enligt planerna ska inkapslingsanläggningen byggas samman med Clab och drivas integrerat med denna. Ett transportsystem som är anpassat till inkapslingsanläggningen och slutförvaret krävs också. Dessutom behövs ett slutförvar för det kortlivade låg- och medelaktiva rivningsavfallet, samt ett slutförvar för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet.

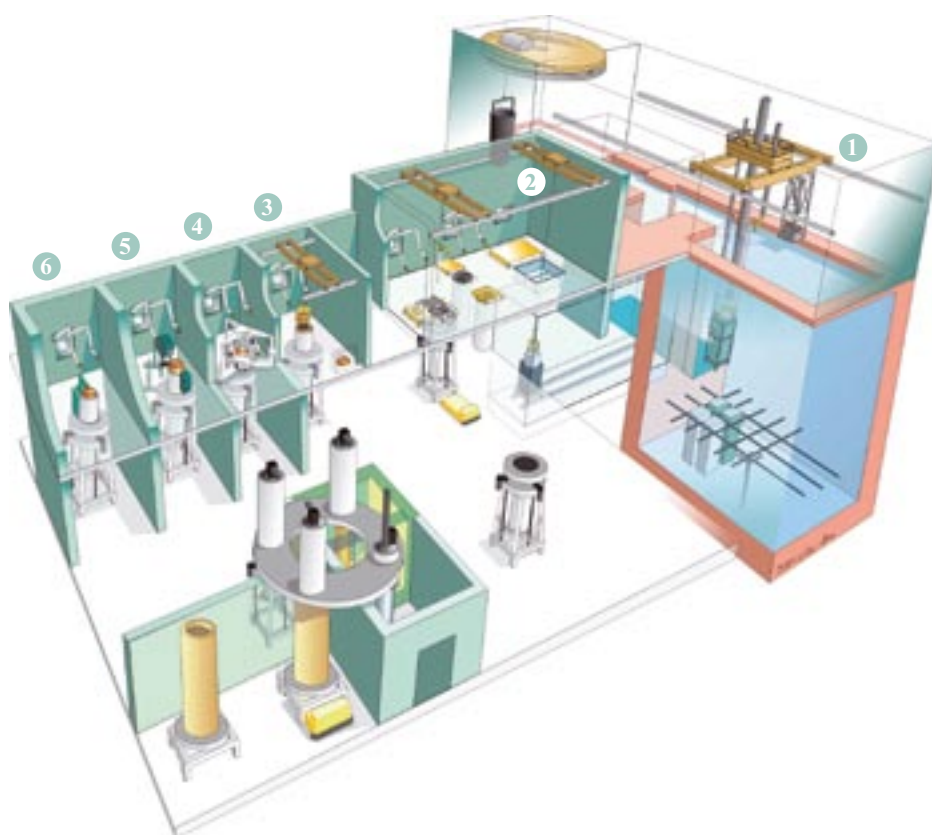
Inkapslingsanläggningen

Arbetet med att projektera inkapslingsanläggningen startade 1993. Anläggningen har sedan dess vidareutvecklats och förändrats. Att bygga anläggningen i Oskarshamn i anslutning till Clab har dock hela tiden varit SKB:s huvudalternativ. Vi har emellertid också studerat möjligheten att bygga inkapslingsanläggningen i Forsmark. En förutsättning för detta är att även slutförvaret placeras där.

I inkapslingsanläggningen finns ett antal stationer för olika arbetsmoment, se figur 1-10. All hantering av bränslet manövreras på avstånd. Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet förs från Clabs bassänger till inkapslingsanläggningens bassänger med hjälp av den befintliga bränslehissen i Clab. I den strålskärmda hanteringscellen torkas bränslet. Bränslet lyfts över till kapseln och kombineras på ett sådant sätt att den totala värmeeffekten i varje kapsel inte blir för stor. Luften i kapseln byts ut mot argon. Därefter försluts kapseln med friction stir welding (en form av friktionssvetsning), varefter svetsens kvalitet kontrolleras. Om svetsen blir godkänd förs kapseln vidare till stationen för maskinbearbetning, där överskottsmaterialet bearbetas bort. Därefter görs en ny kvalitetskontroll av svetsen. Efter rengöring – om så behövs – placeras den förslutna kapseln i en speciell transportbehållare och transporteras till slutförvaret för att deponeras.

Slutförvaret för använt kärnbränsle

Slutförvaret består i sin grundutförning av en ramp, schakt, centralområde samt ett antal deponeringsområden med deponeringstunnlar, se figur 1-11. I varje deponeringstunnel finns ett antal deponeringshål. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen, bestäms utifrån de lokala förutsättningarna på platsen.



1 = Hanteringsbassäng. Bränslet flyttas över från en bränslekassett till en transportkassett.

2 = Hanteringscell. Bränslet torkas och lyfts över till kapseln.

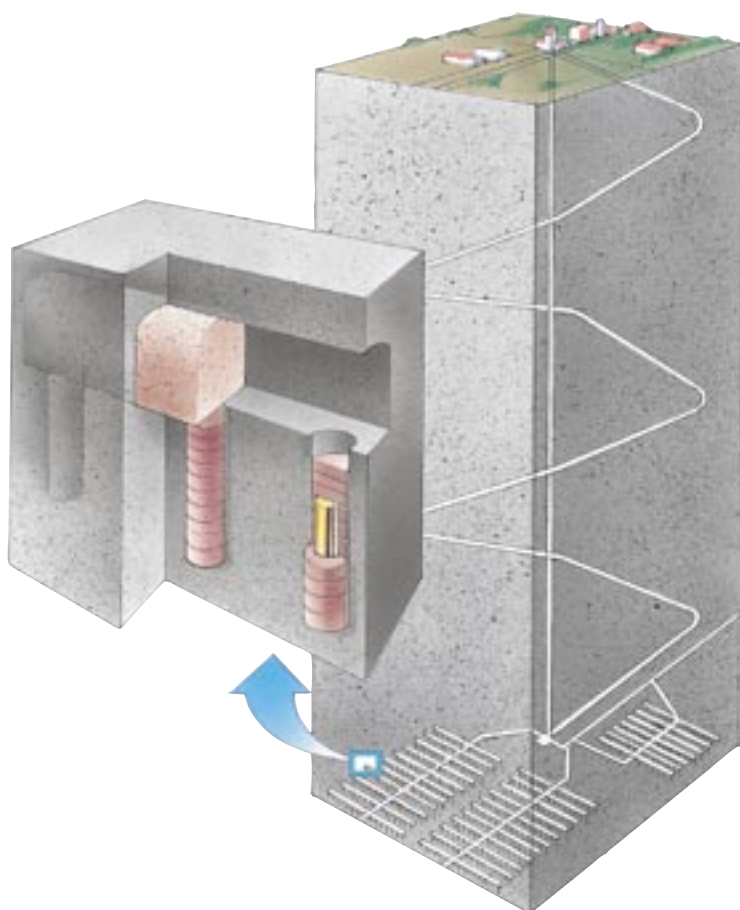
3 = Atmosfärsbyte. Luften i kapseln byts ut mot argon.

4 = Förslutning. Svetsning med friction stir welding.

5 = Oförstörande provning. Svetsarna kontrolleras med ultraljud och röntgen.

6 = Maskinbearbetning.

Figur 1-10. I inkapslingsanläggningen finns stationer för de olika arbetsmoment, som behövs för att kapsla in det använda bränslet och kontrollera förslutningen.



Figur 1-11. Slutförvaret för använt kärnbränsle.

Transporten med kapslarna anländer till slutförvaret och lastas där om till ett specialbyggt transportfordon, som för ner kapslarna till deponeringsnivån. Detta kan ske på olika sätt, beroende på var slutförvaret lokaliseras. Därefter lastas kapslarna om till deponeringsmaskinen för att deponeras. Efter att kapslarna placerats i deponeringshålen, omgivna av bentonitlera, fylls tunneln igen med svällande lera. Även övriga utrymmen fylls igen när allt bränsle har deponerats.

KBS-3-metoden innebär att kapslarna kan placeras antingen vertikalt (KBS-3V) eller horisontellt (KBS-3H). Referensutförningen av KBS-3-metoden bygger på vertikal deponering, medan horisontell deponering kan ses som en annan möjlig utformning av slutförvaret.

Arbetet med att finna en lämplig plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle har pågått i flera decennier. Kompletta platsundersökningar i Forsmark i Östhammars kommun och i Laxemar i Oskarshamns kommun avslutas under 2007. SKB vill bygga slutförvaret på den lämpligaste av dessa platser. Tidigare har vi också genomfört en inledande platsundersökning i Simpevarp i Oskarshamns kommun.

Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL)

Kraftigt neutronbestrålat långlivat avfall, såsom härdkomponenter och interna delar från kraftverken, planerar SKB att slutlagra i en anläggning som liknar SFR, men är förlagd på ett större djup. Avfallet består dels av komponenter från reaktorhärden som byts ut under reaktorns drifttid (exempelvis styrstavar och detektorsonder), dels konstruktionsdelar från reaktorerna (exempelvis härdgaller och moderatortankar). Målet är att i Fud-program 2010 kunna redogöra mer detaljerat för hur SKB planerar att projektera slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Redovisningen kan bland annat innehålla en strategi för val av plats och förvarsdjup samt studier av förvarets dimensioner. En avfallsinventering och bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett tänkt förvar genomförs när ansökan om utbyggnad av SFR slutförts.

1.5 Förutsättningar för planeringen

Planeringen styrs av olika förutsättningar. Det rör sig dels om hur de olika anläggningarna ska utformas. Avfallsets radioaktivitet bestämmer i huvudsak detta. En annan förutsättning är hur stora avfallsmängder som uppkommer. Detta är direkt beroende av hur lång drifttid de olika reaktorerna förutsätts ha. Avfallsets egenskaper påverkar också. Tendensen just nu går mot allt högre medelutbränningsgrader. Höga utbränningsgrader kan exempelvis innebära att fler forskningsinsatser behöver göras inför säkerhetsanalyserna för det använda kärnbränslet. Detta behandlas i kapitel 22 i del IV.

Olika typer av radioaktivt avfall

Kärnavfallet delas in i olika kategorier efter graden av radioaktivitet (låg-, medel- eller högaktivt avfall) samt efter aktivitetens varaktighet (kort- eller långlivat avfall).

Huvuddelen av avfallet från kärnkraftverken, cirka 85 procent av volymen, är kortlivat och låg- och medelaktivt. Det uppkommer både vid driften av anläggningarna och när dessa rivs. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Rivningsavfallet består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Vid driften och rivningen av kärnkraftverken uppkommer också långlivat låg- och medelaktivt avfall. Förbrukade komponenter från reaktorhärden eller dess omedelbara närhet tillhör denna kategori. Komponenterna innehåller långlivade ämnen, som bildas när stabila ämnen i till exempel stål utsätts för stark neutronstrålning från reaktorhärden.

Använt kärnbränsle utgör en mindre del av den totala avfallsvolymen, men innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet, både kort- och långlivad. De radioaktiva ämnens sönderfall gör att de avger strålning och alstrar värme (resteffekt). Efterhand som de kortlivade ämnena i bränslet sönderfaller kommer radioaktiviteten att domineras av de långlivade ämnena. Använt kärnbränsle kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Värmen som utvecklas måste kylas bort för att bränslet inte ska överhettas. Innehållet av långlivade radioaktiva ämnen avgör hur ett slutförvar bör utformas. Förekomsten av klyvbart material fordrar åtgärder som förhindrar kriticitet eller att bränslet ska komma i orätta händer.

Avfallsmängder

De totala mängderna kärnavfall, som ska tas om hand, beror på antalet kärnreaktorer och deras drifttid. För närvarande är tio reaktorer i drift. Avfallsmängderna påverkar den kapacitet och den drifttid olika avfallsanläggningar behöver ha. Däremot påverkar inte mängderna de grundläggande steg eller de typer av anläggningar som behövs för att ta hand om avfallet.

Mängden använt kärnbränsle anges oftast som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet. Den bränslemängd² som förbrukats i de svenska kraftreaktorerna till och med år 2006 är 5 000 ton uran från kokvattenreaktorer (BWR) och 1 500 ton uran från tryckvattenreaktorer (PWR).

Kärnbränsleprogrammet ska hantera allt använt bränsle som driften av de svenska kärnkraftverken ger upphov till. Det måste därför anpassas till olika utfall när det gäller återstoden av kärnenergiproduktionen. Nyligen har ägarna till kärnkraftverken ändrat den beräknade drifttiden. Tidigare baserades alla prognoser på 40 års drifttid, vilket gav upphov till 9 600 ton bränsle (räknat som uran), motsvarande 4 500 kapslar. Den långsiktiga planeringen för kärnbränsleprogrammet baserar sig numera på ett nytt referensscenario där reaktorerna i Ringhals och Forsmark förutsätts ha en drifttid på 50 år och OKG:s reaktorer ha en drifttid på 60 år. Den mängd som ska slutförvaras uppgår till cirka 12 000 ton uran, motsvarande ungefär 6 000 kapslar.

² Inkluderar uttaget bränsle samt nuvarande reaktorhärddar.

Loma-programmet syftar till att ta hand om allt det låg- och medelaktiva drift- och rivningsavfallet från det svenska kärnkraftsprogrammet. Det enda undantaget är det mycket lågaktiva driftavfallet som kraftbolagen väljer att deponera på sina interna markdeponier. Även Loma-programmet påverkas av de förlängda drifttiderna för reaktorerna. Det nya referensscenariot ger totalt upphov till cirka 212 000 m³ kortlivat avfall och cirka 8 700 m³ långlivat avfall från kärnkraftverken.

Den ökade drifttiden av reaktorerna innebär således att drifttiderna både för SFR och slutförvaret förändras, liksom volymer av avfall och bränsle. Driften av Clab och inkapslingsanläggningen förlängs samtidigt som driftstarten för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL, senareläggs.

Utbränningsgrad

Utbränning är ett mått på den energi som utvunnits ur bränsleelementet och anges i megawattdygn per kilo uran (MWd/kgU). När utbränningen nått en viss nivå byts bränsleelementet ut. I och med den tekniska utvecklingen av bränslet har både utbränningen och anrikningsgraden successivt ökat sedan reaktorerna ursprungligen togs i drift. Motivet till detta är att få en så ekonomiskt fördelaktig drift av reaktorerna som möjligt.

De värden för utbränning och anrikning som är dimensionerande i ansökan för Clab och inkapslingsanläggningen är:

BWR 55 MWd/kgU; 3,6 procent uran-235

PWR 60 MWd/kgU; 4,3 procent uran-235

BWR Mox 50 MWd/kgU; 4,5 procent Pu-fiss

Det finns i dag planer hos kärnkraftföretagen att använda bränsle med högre anrikning och utbränning; 60 MWd/kgU och 5 procent uran-235 för både PWR- och BWR-bränsle. I denna planering är det viktigt att klargöra vilka konsekvenser dessa förändringar kan ha för slutförvarssystemet. En viktig del är att förutsättningarna är desamma för alla delar i systemet (transportbehållare för använt bränsle, Clab, inkapslingsanläggning, transportbehållare för fylld kopparkapsel samt slutförvaret). Vi bedömer att vi i dag har tillräckligt med data för kommande säkerhetsanalys, SR-Site, för bränslet som använts som underlag i ansökan för Clab och inkapslingsanläggningen. Dock måste en komplettering göras för det Mox-bränsle som finns hos OKG. Frågan om kriticitet behöver också diskuteras ytterligare med anledning av den högre anrikningsgraden.

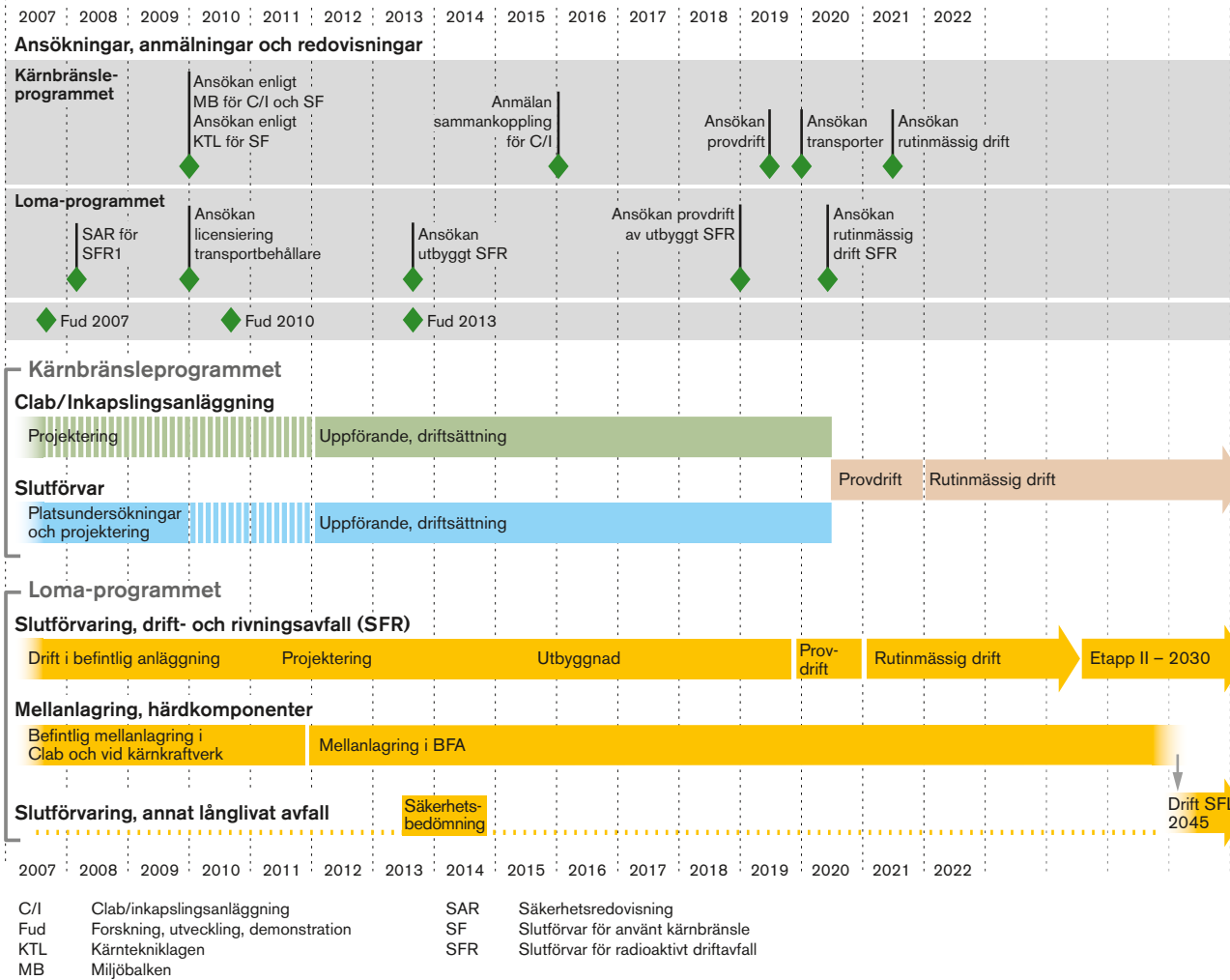
1.6 SKB:s huvudtidsplan

Tidsplanen för att uppföra och ta i drift de anläggningar som behövs för att slutförvara det använda kärnbränslet och det låg- och medelaktiva avfallet styrs dels av behovet av tekniska åtgärder, dels av lagstiftningens krav på tillstånd. Med utgångspunkt från detta har vi identifierat ett antal viktiga milstolpar fram till dess att slutförvaret tas i rutinmässig drift. Milstolparna för respektive program specificeras och beskrivs i kapitel 2 respektive 3. Figur 1-12 visar en översikt över SKB:s planering för hela kärnavfallsprogrammet.

Andra viktiga förutsättningar som måste uppfyllas för att tidsplanen ska kunna förverkligas är:

- Att inkapslingsanläggningen byggs samman med Clab till en integrerad anläggning. Om lokaliseringen vid Clab faller bort som huvudalternativ måste tidsplanen revideras.
- Att utvecklingen av tekniken för inkapsling och slutförvaring drivs vidare i den takt som planeras och med de framsteg som förväntas. Övåntade svårigheter på någon kritisk punkt kan medföra förseningar och revideringar.
- Att SKB erhåller tillåtlighets- och tillståndsbeslut från regeringen inom två år från det att ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret och ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet lämnas in. Dessutom krävs att dessa beslut inte överklagas till högre instans.

Kärnavfallsprogrammet



Figur 1-12. SKB:s huvudtidsplan med de redovisningar som ska göras.

2 Kärnbränsleprogrammet

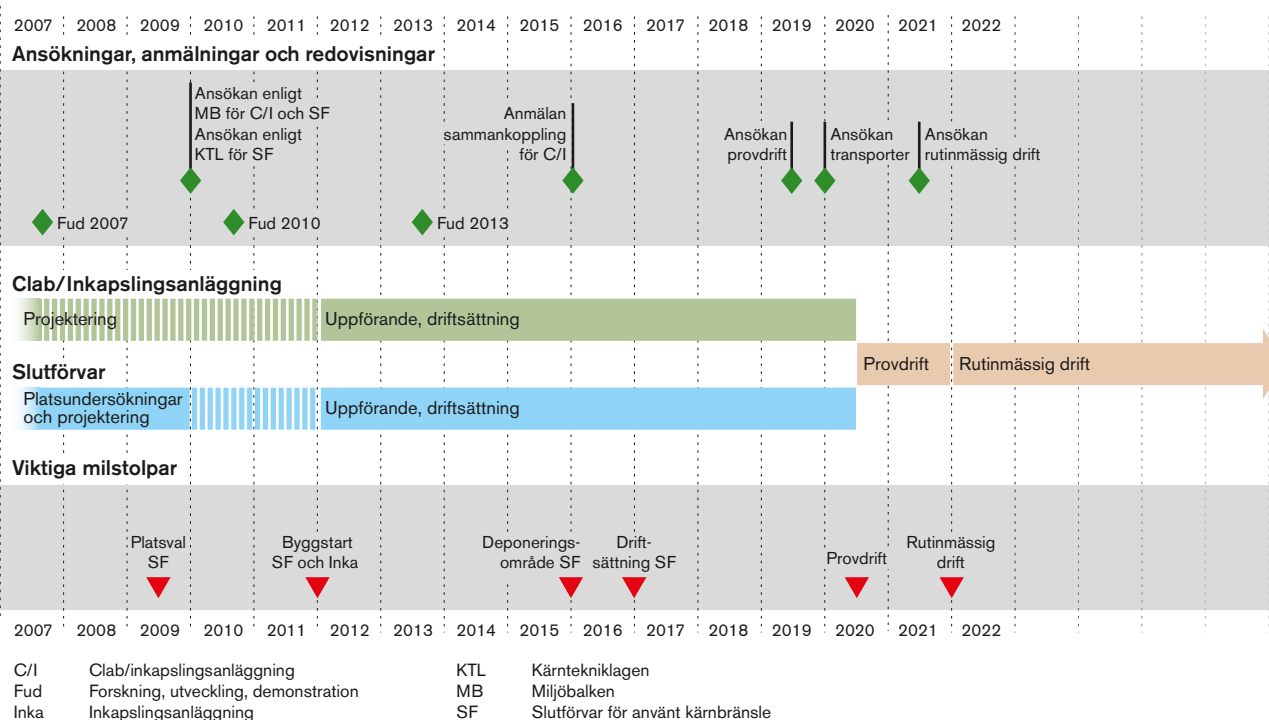
Tidsplanen för att uppföra och ta i drift de anläggningar som behövs för att slutförvara det använda kärnbränslet – inkapslingsanläggning, slutförvar och transportsystem – styrs dels av behovet av tekniska åtgärder, dels av lagstiftningens krav på tillstånd. Med utgångspunkt från detta har vi identifierat ett antal viktiga milstolpar fram till dess att slutförvaret tas i rutinmässig drift. Planeringen redovisar översiktligt alla de åtgärder som behövs för att genomföra kärnbränsleprogrammet. Den mera detaljerade planeringen sträcker sig över en tidsperiod av cirka 15 år.

Figur 2-1 visar den övergripande planen och de övergripande milstolparna. Den mer detaljerade planeringen inför och efter varje milstolpe redovisas i Fud-programmets del II–IV. När det gäller innehåll och omfattning av ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret för använt kärnbränsle och ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet så hänvisas till rapporten ”Ansökansplan för inkapslingsanläggning och slutförvar för använt kärnbränsle” /2-1/. SKB:s arbete med struktur och innehåll på ansökan samt framtagning av underlag kommer att fortsätta tills ansökan lämnas in. Regelbundna avstämningar kommer att ske med myndigheterna inom ramen för de samråd som förs enligt tidigare regeringsbeslut om Fud. SKB avser även informera om det planerade innehållet i ansökningarna i andra fora.

De övergripande milstolparna är indelade i två kategorier. Den första gruppen består av ansökningar, anmälningar och lagstadgade redovisningar. Den andra gruppen innehåller andra viktiga milstolpar, som vi behöver passera för att kunna uppföra och ta anläggningarna i drift. Till dessa hör exempelvis platsval, byggstart och driftsättning.

Kopplingen mellan programmets framskridande i relation till dessa milstolpar och behovet av resultat från teknikutveckling beskrivs i del II där planerna för uppförandet av slutförvaret redovisas. I redovisningen nedan ges en översiktlig beskrivning och hänvisningar till relevanta avsnitt i del II. De planerade teknikutvecklingsinsatserna redovisas sedan i del III och kopplingen till milstolparna erhålls via hänvisningarna i del II. Arbetet med säkerhetsanalys och de prioriterade forskningsområdena redovisas i del IV.

Kärnbränsleprogrammet



Figur 2-1. Tidsplan för kärnbränsleprogrammet.

2.1 Planering

Det svenska kärnbränsleprogrammet blir troligen det första projektet i sitt slag i världen som ska prövas. Arbetet har pågått under flera decennier och har hela tiden skett genom en stegvis utveckling. I takt med att kunskapen om KBS-3-systemet och dess delsystem och komponenter har vuxit fram har också förutsättningarna justerats och som en följd av sådana justeringar har tidsplanen ändrats.

Tidsperioden fram till ansökan om slutförvaret innehåller den sista cykeln i platsundersökningarna av datainsamling, dataanalys, projektering och säkerhetsanalys. Under denna tidsperiod ska även ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret, ansökan enligt miljöbalken om slutförvarssystemet och kompletteringen av ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen ställas samman. Mot bakgrund av gjorda erfarenheter bedömer nu SKB att ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret kan lämnas in i slutet av 2009.

De granskningssynpunkter som SKI och SSI lämnar på ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen och på säkerhetsanalysen SR-Can kan eventuellt påverka tidsplanen för att ta fram de ansökningar som planeras 2009. Tidsplanen kan behöva justeras ytterligare beroende på omfattningen av de åtgärder som synpunkterna kan medföra.

Under tidsperioden från det att en ansökan lämnats in till dess att tillstånd meddelats kommer de olika prövningsärendena att hanteras av SKI, miljödomstolen och regeringen. Till detta kommer att kommunen ska yttra sig i miljöbalksärendet samt att plan- och bygglovsärendet ska behandlas. SKB har begränsade möjligheter att styra tiden från det att ansökan enligt miljöbalken lämnas in till dess att det sista tillståndet meddelats, men uppskattar periodens längd till minst två år.

SKB har uppskattat den tid som behövs för att uppföra inkapslingsanläggningen, tillfarterna till slutförvarets försvarsnivå och slutförvarets centralområde. Osäkerheter finns som beror på platsens egenskaper, vilken metod som används för att ta ut berg samt teknikutvecklingen för de olika delsystemen. Förutom rena byggaktiviteter ingår alla arbetsmoment som är förknippade med den förnyade säkerhetsredovisningen inför provdriften. Under denna tid färdigställs även de maskiner och system som behövs för att framställa kapslar, buffert och återfyllning samt för att deponera kapslarna. Innan provdriften kan börja granskar myndigheterna ansökan och underlaget till denna. Vi uppskattar att tiden från byggstart till ansökan om provdrift blir cirka sju år.

Provdraft och rutinmässig drift bygger på den terminologi och det synsätt som finns i SKI:s föreskrifter.

Tidpunkten för övergång från provdrift till rutinmässig drift är också beroende av myndighetsbeslut. En uppskattning av tidpunkt när den rutinmässiga driften kan starta är självfallet behäftad med stora osäkerheter, eftersom den ligger så långt fram i tiden. Vi uppskattar dock att den kan inledas inom två år efter starten av provdriften.

En given förutsättning för att slutförvaret ska kunna uppföras och drivas är att den teknik som behövs i olika skeden finns utvecklad och färdig att tas i industriellt bruk i den takt behoven uppstår. Del II (kapitel 6) redovisar nuläget för den arbetsmetodik som utarbetas för projektering och teknikimplementering under uppförande och drift. SKB:s program för teknikutveckling redovisas i del III. Där framgår också vilka utvecklingsbehov som finns för olika delsystem.

2.2 Milstolpar

2.2.1 Ansökningar, anmälningar och redovisningar

Ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret

I ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret kommer SKB att redogöra för det tekniska underlag som behövs för att bedöma om slutförvaret uppfyller de krav som ställs på anläggningen enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen med tillhörande föreskrifter och förordningar. En säkerhetsredovisning (PSAR) av driftsäkerhet och långsiktig säkerhet kommer att vara ett av underlagen till ansökan. Ansökan innehåller också en miljökonsekvensbeskrivning samt en redogörelse för hur SKB uppfyller miljöbalkens allmänna hänsynsregler. Miljökonsekvensbeskrivningen kommer att

vara gemensam för anläggningarna i prövningarna enligt både kärntekniklagen och miljöbalken. En övergripande beskrivning av innehållet i dessa ansökningar finns i ”Ansökansplan för inkapslingsanläggning och slutförvar för använt kärnbränsle” /2-1/.

I ansökan kommer vi att redovisa den teknik som vi vill använda för att bygga och driftsätta slutförvaret samt hur arbetet avses genomföras. I del II (kapitel 6) redovisar vi nuläget för den arbetsmetodik som utarbetas för projektering och teknikimplementering under uppförande och drift av slutförvarsanläggningen. I del II (kapitel 5) redogör vi också för hur långt vi planerar att ha hunnit när det gäller teknikutveckling när ansökan lämnas in, se tabell 2-1 till 2-4. SKB:s program för teknikutveckling redovisas i del III.

Ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet

SKB kommer att lämna in en ansökan till miljödomstolen för de verksamheter inom KBS-3-systemet som är tillståndspliktiga enligt miljöbalken.

En förutsättning för att tillstånd enligt miljöbalken ska kunna beviljas är att verksamheten i fråga inte strider mot gällande detaljplan eller områdesbestämmelser enligt plan- och bygglagen. Ärenden enligt plan- och bygglagen kommer att hanteras parallellt med att ovan angivna prövningar förbereds och pågår hos myndigheter, miljödomstol och regering.

Fud-program 2010

Det kommande Fud-programmet, Fud-program 2010, kommer att inriktas mot Loma-programmet samt de framsteg avseende kunskapsläge och teknikutveckling som gjorts avseende slutförvaring av använt kärnbränsle.

Anmälan om sammankoppling av Clab och inkapslingsanläggningen

När inkapslingsanläggningen uppförts ska den kopplas samman med Clab. Det innebär att byggnadsdelarnas väggar öppnas upp mot varandra, varvid rum och korridorer byggs ihop. Då kopplas även de olika systemen samman och därefter provas installationerna system för system. Innan sammankopplingen sker görs en anmälan till SKI.

Ansökan om tillstånd för transporter

SKB har sedan tidigare tillstånd från SKI och SSI för transporter av kärnämne. Tillstånden förnyas med ungefär tre års intervall. Förutom tillstånden ska varje transport anmälas till myndigheterna i förväg. Innan kapseltransporterna påbörjas kommer SKB att ansöka om tillstånd hos myndigheterna för att transportera kapslar med använt bränsle på liknande sätt som bränsletransporter sker i dag. SKB avser också licensiera kapseltransportbehållarna i Sverige. Licensieringen påbörjas innan transporttillståndet uppdateras.

Ansökningar om provdrift

Samfunktionsprovning av respektive anläggningssystem ska ske när anläggningarna är uppförda. När system och processer fungerat som avsett lämnar SKB in en ansökan för respektive anläggning om att inleda provdrift. Provdrift innebär att kärnämne tillförs och hanteras i respektive anläggning. SKB:s begäran om att få påbörja provdrift innehåller uppdaterade analyser av den långsiktiga säkerheten, förnyade säkerhetsredovisningar samt säkerhetstekniska driftförutsättningar.

Ansökningar om rutinmässig drift

Provdriften är till för att ta tillvara erfarenheter. Säkerhetsredovisningarna och de säkerhetstekniska driftförutsättningarna kompletteras och ingår som underlag i SKB:s ansökan om att få påbörja rutinmässig drift för anläggningarna.

2.2.2 Andra viktiga milstolpar

Förutom de redovisningar som vi ska lämna till myndigheterna för att erhålla olika tillstånd eller medgivanden på vägen till en driftsatt anläggning finns ytterligare viktiga milstolpar, som infaller vid andra tillfällen. Till gruppen övriga viktiga milstolpar hör exempelvis olika beslut, som måste fattas av SKB.

Platsval

Att välja en av de två aktuella platserna för slutförvaret är en förutsättning för att kunna inleda konkreta förberedelser för att etablera förvaret. Underlag som kommer att finnas framme som stöd för att kunna välja en plats är platsbeskrivningar baserade på genomförda undersökningar och analyser och platsanpassade slutförvarsanläggningar samt analyser och bedömningar av miljökonsekvenser, säkerhet och strålskydd under drift och på lång sikt. Den samlade utvärderingen och platsvalet beskrivs i del II, avsnitt 4.3.

I anslutning till platsvalet planerar SKB att starta ett projekt med uppgift att bygga slutförvaret. Planeringen av detta projekt pågår.

Uppförande

När alla erforderliga tillstånd och villkor enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen, miljöbalken och plan- och bygglagen har erhållits kan anläggningarna börja byggas, både ovan och under mark. SKB måste ta ställning till konsekvenserna av villkoren i tillstånden före byggstart och anpassa planeringen efter dessa.

I arbetet med planering av byggskedet ingår att ta fram ett program för undersökningar under bygge och drift, att ange planeringsförutsättningar som kommer att vara styrande för slutförvaret och inkapslingsanläggningen. I planeringen ingår att beskriva hur vi ska bedriva den fortsatta teknikutvecklingen och hur den ska samordnas med själva uppförandet av slutförvarssystemet.

Tillfarter till förvarsdjup

Vid tidpunkten för byggstarten måste teknik för att bygga tillfarterna till förvaret – sänkschakt och ramp – vara vald och väl förberedd. Dessa anläggningsdelar ligger på den tidsmässigt kritiska linjen under uppförandeskedet och drivningen kommer därför att inledas så snart som möjligt. Vi måste också ha demonstrerat att vi kan tillverka och installera slutförvarets kapsel och buffert samt att vi kan återfylla alla utrymmen på ett sätt så att ställda krav och specifikationer kan uppfyllas. I del II (kapitel 4) redogör vi för hur långt vi planerar att ha hunnit när det gäller teknikutveckling inför byggstart, se tabell 4-1 till 4-4.

Påbörja utbyggnad av deponeringsområden

Deponeringsområdets exakta läge och utformning kommer inte att vara fastställd vid ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret. Under utbyggnaden av berganläggningarna utförs undersökningar för att underbygga säkerhetsanalysen och för att utforma förvaret i detalj. Vid tillredning av tillfarter och centralområde kommer i huvudsak projekteringens och byggets behov att styra undersökningarna. Inför och under utbyggnad av deponeringsområdet kommer behovet av information med bäring på den långsiktiga säkerheten att ha ett mer direkt inflytande på de undersökningar som utförs. Innan utbyggnaden av deponeringsområdena inleds måste SKB ha fastlagt vilken metod för bergguttag som ska användas och vilka dimensioner deponeringstunnlarna ska ha. Tillträdet till förvarsnivån är en viktig avstämningsspunkt för utveckling och implementering av den teknik som ska användas i slutförvaret. Vid den tidpunkten bör all teknik för deponering av kapsel och buffert vara väl utprovad och under intrimning, se också tabell 5-1 till 5-4 i del II. Detsamma gäller för återfyllningen av deponeringstunneln.

Driftsättning

Innan SKB ansöker om att få inleda provdriften av Clab och inkapslingsanläggningen respektive slutförvaret behöver systemen driftsättas. Hela systemets funktion ska även prövas som en helhet, utan att kärnämnen är på plats. Driftsättningen omfattar samfunktionsprov av samtliga ingående system och systemdelar i såväl Clab och inkapslingsanläggningen som i slutförvaret. En fortsatt utbyggnad av deponeringsområdena i slutförvaret pågår kontinuerligt under hela driftsättningen. Starten av driftsättningarna av inkapslingsanläggningen respektive slutförvaret behöver inte ske samtidigt.

Driftsättning innebär att alla tekniska system ska tas i drift. Vid den tidpunkten ska de vara testade, verifierade etc. Inför driftsättningen ska också kvalificeringar av tillverkning, förslutning och oförstörande kontroller av kapseln vara genomförda.

Provdrift

Provdriften omfattar hantering av använt bränsle i båda anläggningarna – inkapslingsanläggningen och slutförvarsanläggningen. Provdriften inleds när SKB medgettts påbörja provdriften för respektive anläggning och pågår fram till dess att SKI medger att den rutinmässiga driften får inledas.

Rutinmässig drift

Den rutinmässiga driften startar och pågår tills förslutning kan inledas.

Förslutning

En viktig princip i utvecklingen av KBS-3-metoden är att när förvaret är förslutet ska det för sin säkerhet inte vara beroende av system för långtidsobservationer eller övervakning. Det finns i Sverige inga formella krav på återtag av deponerade kapslar. Hur en kapsel tas tillbaka beror på när beslutet fattas. Ju längre tid som gått efter deponeringen av en kapsel, desto större insats krävs. Om beslutet fattas direkt efter deponeringen och deponeringstunneln inte är återfylld kan kapseln tas tillbaka med samma maskin som användes för deponeringen. Är deponeringstunneln däremot återfylld och försluten ökar givetvis arbetsinsatsen. Om kapslar ska tas tillbaka flera år efter deponeringen och bentoniten nått fullt svälltryck blir insatsen ännu mera omfattande bland annat på grund av att deformationer kan medföra risk för fallande bergblock vid borttagning av återfyllningen. Vidare måste kapseln frigöras från bufferten innan den kan lyftas upp ur deponeringshålet. SKB har i det så kallade Återtagsförsöket i Äspölaboratoriet visat att det är praktiskt möjligt att frilägga en kapsel från mättad bentonit och genomföra ett återtag.

I och med att förvaret förslutits har SKB uppfyllt kraven i lagen på säker slutförvaring av det använda bränslet. När det gäller sistaansvar för ett slutförvar så beskrivs detta /2-2/. Vi kommer då att ha lämnat den informationen till omvärlden, som vi bedömer är tillräcklig för att kommande generationer ska kunna agera.

2.3 Alternativ förvarsutformning – KBS-3H

SKB inledde 2002 studier av horisontell deponering av kapslar, KBS-3H. Bakgrunden är att horisontell deponering kan ge fördelar från miljö- och kostnadssynpunkt. Eftersom deponeringstunnlarna vid horisontell deponering också utgör själva deponeringshålen, så minskas den bergvolym som behöver tas ut, liksom de utrymmen som behöver återfyllas. Det finns därför en möjlighet att KBS-3H blir intressant ur ett optimeringsperspektiv.

Arbetet med KBS-3H sker i nära samarbete med Posiva i Finland. I Fud-rapportens del III beskrivs utvecklingsläget. Posiva redovisar motsvarande i sitt forskningsprogram /2-3/. Parallellt med att Fud-program 2007 skrivs gör vi en första utvärdering av horisontell deponering. Enligt preliminära slutsatser bedömer vi att det finns anledning att fortsätta utvecklingsarbetet med KBS-3H. Innan vi fattar beslut om fortsättning behöver denna utvärdering färdigställas vilket kommer att ske i slutet av 2007.

Målsättningen för en eventuell fortsättning är att utveckla KBS-3H så att kraven på långsiktig säkerhet uppnås samt att vi har tillräcklig kunskap för att kunna jämföra det med referensalternativet.

En stor del av den kunskap som behövs vid värderingen av KBS-3H finns redan genom det utvecklingsarbete vi har gjort. Anläggningar ovan jord, nerfarter och centralområdet i förvaret kommer att påverkas marginellt av hur deponeringen kommer att utföras. Inkapslingsteknik och kapseldimensioner påverkas inte heller. Då säkerhetsfilosofin för de båda alternativen är densamma kommer fokus i säkerhetsanalysarbetet vara att se på skillnaderna. Resultat från studier av buffert- och återfyllnadsmaterial, som görs för vertikal deponering, blir lika viktiga för båda alternativ. Några processer är dock specifika för KBS-3H, till exempel mättnad av bufferten längs med deponeringstunneln och närvaron av stålkomponenter i tunneln. Studier pågår redan av dessa frågor. Då vi antar att ett KBS-3H-förvar kommer att kunna utnyttja samma bergvolym som vid vertikal deponering planeras inget arbete omkring förvarslayout i detta skede.

En viktig strategisk fråga som vi har att ta ställning till är när ett eventuellt byte till KBS-3H behöver göras och vilka motiv som ska gälla. Viktiga villkor för ett byte är.

- Uppfylla säkerhetskraven.
- Tillämplig teknik lika säker som för KBS-3V.
- Bättre resurshållning.
- Minskad påverkan på miljön.

Planeringen för en fortsättning av utvecklingsarbetet med KBS-3H måste också göras med hänsyn taget till planeringen för referensalternativet. Hänsyn måste bland annat tas till tidpunkt för ändringar i produktionsbyggnader och de ekonomiska konsekvenserna. Vi har därför identifierat några viktiga milstolpar för fortsättningen. Vid planeringen av dessa milstolpar har vi också tagit hänsyn till resurser:

- Beslut om start av nästa utvecklingsfas (2007/2008).
- Beslut om fullskaletest av hela KBS-3H-systemet (tidigast hösten 2009).
- Rapport om långsiktig säkerhet, driftsäkerhet och MKB (tidigast 2011/2012).
- Beslut om att byta till horisontell deponering kan göras när tillräckligt underlag finns för jämförelse med KBS3-V (2012/2013).

SKB kan avbryta utvecklingen av KBS-3H när som helst under perioden fram till 2012 om skäl kommer fram för detta i utvecklingsarbetet.

2.4 Kravhantering och kvalificering

En av förutsättningarna för att SKB ska få drifttillstånd för sina anläggningar är att de uppfyller alla krav som SKB, myndigheterna och andra intressenter ställer. När det gäller slutförvaret utvecklar SKB metodik och rutiner för detta. Ställda krav och övriga konstruktionsförutsättningar dokumenteras i en databas.

För tillverkningen av kapslar har ytterligare ett steg tagits för att säkerställa att kraven uppfylls. Leverantörer, tillverknings- och kontrollprocesser kommer att kvalificeras. SKB har presenterat ett program för hur detta ska göras.

Kravhantering

I den tidiga utvecklingen av KBS-3-metoden låg tyngdpunkten på att analysera och utvärdera den långsiktiga säkerheten. I senare utvärderingar har driftsäkerhet, miljöpåverkan, kvalitetssäkring och effektivitet blivit allt viktigare komponenter. För att få en samlad bild av de krav och restriktioner som utgör konstruktionsförutsättningar för slutförvaret har vi tagit fram en metodik för systematisk hantering av krav och andra konstruktionsförutsättningar. Ett övergripande syfte med den systematiska kravhanteringen är att tydliggöra mål och underlätta systemförståelse. Detaljer i arbetet med

konstruktion och projektering sätts på så sätt in i sitt sammanhang och kan härledas till ställda krav. Underlag och motiv för slutförvarets utformning blir därmed spårbara.

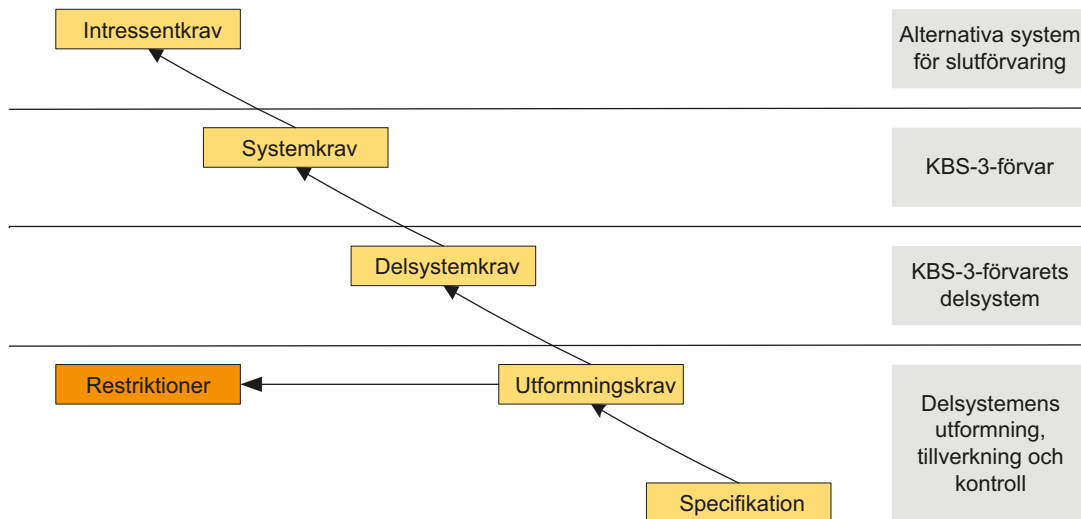
Resultat från föregående utvecklingskedje, som utgör grunden för det kommande skedet, dokumenteras som restriktioner i en kravdatabas. I databasen dokumenteras också vilket underlag utformning och restriktioner baseras på. På så sätt säkerställer vi att utvecklingen av hela systemet görs spårbar. Den systematiska kravhanteringen ger också en bas för att utforma kontrollprogram, så att dessa fokuserar på att uppfylla ställda krav.

Konstruktionsförutsättningarna har delats in i *krav* och *restriktioner*. Kraven är uttryck eller uttalanden, som olika intressegrupper ställer för att acceptera slutförvaret eller någon av dess delar. Restriktioner är förhållanden, egenskaper, händelser eller processer som påverkar utformningen och som kan begränsa handlingsfriheten. Restriktionerna kan vara naturliga, till exempel betingade av platsens egenskaper. De kan också vara skapade av människan, såsom det använda bränslets egenskaper.

Kraven grupperas i nivåer relaterade till slutförvaret, dess delsystem och komponenter – från övergripande mål och principer till detaljerade specifikationer. På den översta nivån finns *intressentkraven*. Dessa utgår från intressenters krav och önskemål. Exempel på intressenter är det omgivande samhället och SKB:s ägare. Samhällets krav uttrycks i allmänhet i form av lagar, förordningar och myndighetsföreskrifter som SKB har att leva upp till.

På de två nästa kravnivåerna finns *system-* och *delsystemkraven*. De utgår från intressentkraven och den valda systemlösningen. System- och delsystemkraven uttrycker hur KBS-3-förvaret och dess delsystem ska fungera och vilka egenskaper de ska ha för att uppfylla de överordnade kraven.

På nivån under delsystemkrav finns *utformningskrav*, som ligger till grund för designarbetet. Utformningskraven baseras dels på delsystemkraven och dels på restriktionerna, som beskriver de förutsättningar under vilka delsystemkraven ska vara uppfyllda. Slutligen finns specifikationer som redovisar hur delsystemens olika komponenter ska utformas, tillverkas och kontrolleras. Figur 2-2 visar de olika typerna av konstruktionsförutsättningar och deras inbördes relationer.



Figur 2-2. Hierarkin av krav och andra konstruktionsförutsättningar, deras inbördes relationer och relation till slutförvarets detaljeringsnivå.

Databasen, med ingående krav och restriktioner, uppdateras stegvis allt eftersom ny kunskap och nya villkor från myndigheterna tillkommer. Större genomgångar och uppdateringar förväntas ske vid följande tillfällen:

- När ansökan om slutförvaret lämnas in och detaljprojekteringen inleds. Vid detta tillfälle tas resultat från säkerhetsanalysen SR-Site tillvara.
- När tillstånd erhållits för att uppföra slutförvaret och eventuella villkor för uppförande och drift blivit fastställda.
- När förnyade eller kompletterade säkerhetsanalyser genomförts eller när projekteringen går in i ett nytt skede, till exempel i samband med ansökan om provdrift.

Kvalificering av tillverkning och svetsning av kapslar

SKB redovisade i Fud-program 2004 det övergripande arbetet med kvalificering av tillverknings- och svetsmetoder för kapseln och för metoder för oförstörande provning, OFP. SKI har i sin granskning påpekat nödvändigheten av att ta fram konstruktionsförutsättningar, belastningsunderlag och hållfasthetsanalyser som grund för kraven vid kvalificering. SKI framhöll också vikten av att precisera de processer och produkter som ska kvalificeras.

Arbetet inom området kvalificering av kapsel har genomförts enligt Fud 2004. Vi har presenterat ett program som beskriver hur vi avser att arbeta vidare med kvalificering /2-4/. Vidare har vi genomfört en systematisk kravanalys för processer och system samt tagit fram preliminära konstruktionsförutsättningar för kapseln /2-5/.

Tillförlitligheten vid förslutning av kapslarna har analyserats genom oförstörande provning av förslutningssvetsen /2-6/ och dels i svetsprocessen /2-7/. Sannolikheten för defekta svetsar har också studerats. Dessa studier utgör de första stegen mot att ta fram kvalificeringsunderlag för svetsning och OFP av svetsen.

Skadetålighetsanalyser av kapselns komponenter, med hänsyn till olika belastningsfall och möjliga skadetyper pågår med syfte att fastställa detekteringsmål för OFP.

En första icke formell kvalificering (prekvalificering) av en tillverkningsprocess enligt kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkning "Qualification of Manufacturing process (KT0602)" har genomförts. Syftet med prekvalificeringarna är att få erfarenheter av hur kvalificering inom olika industrier ska genomföras enligt SKB:s rutiner. Kvalificeringen utgör inledningen av en serie prekvalificeringar som framgår av kvalificeringsprogrammet /2-8/ och omfattar både tillverknings- och svetsprocesser.

SKI har i en utredningsrapport /2-9/ tydliggjort sina ståndpunkter avseende hur SKI:s regelverk ska tillämpas i en kontrollordning för kapseln.

Vi bedömer att det är lämpligt att samordna frågorna kring kontrollordning för hela slutförvarsanläggningen. En gemensam strategi där anpassningar görs för de olika produktionslinjerna kommer att tas fram.

3 Loma-programmet

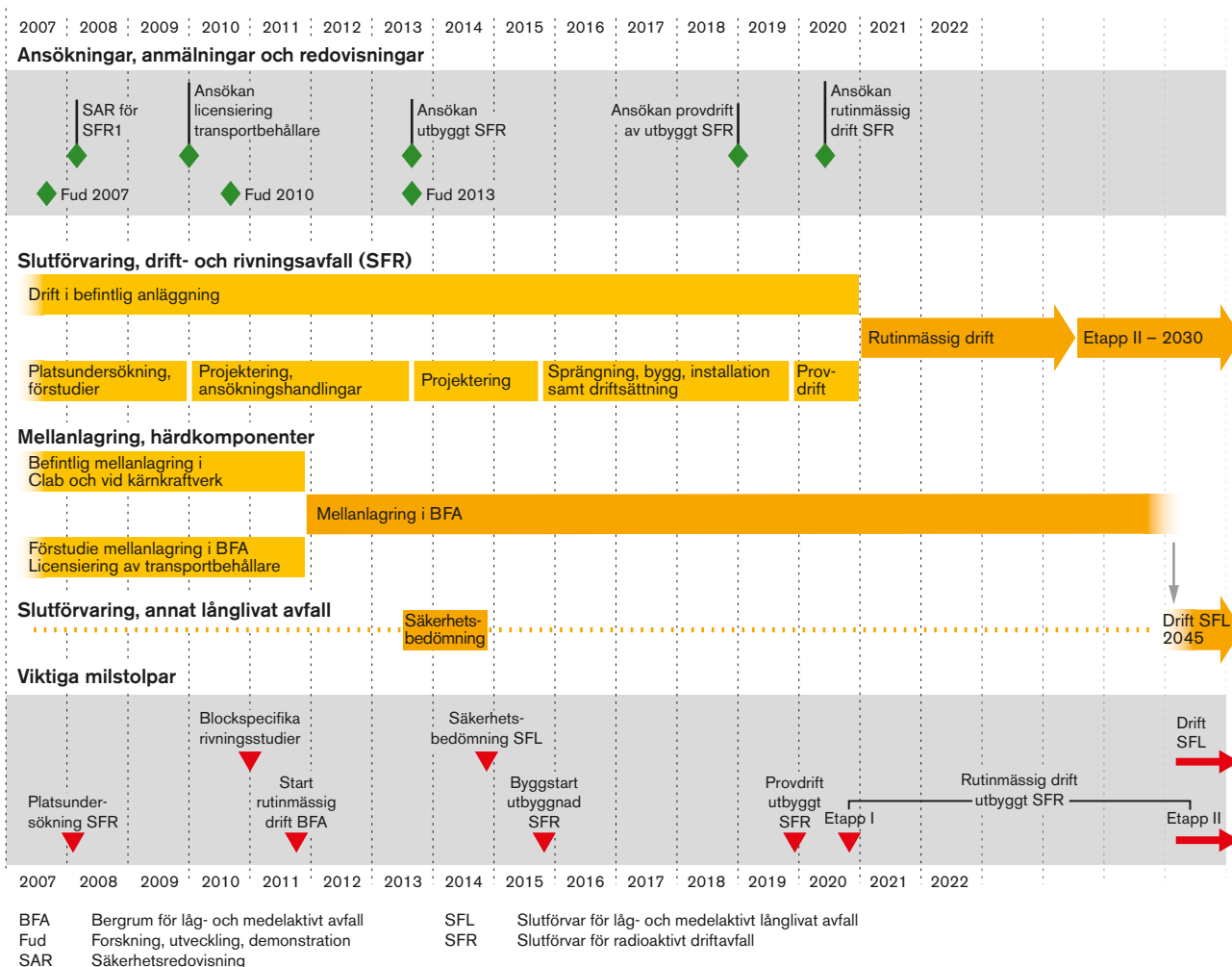
För att ta Loma-programmets anläggningar i drift krävs en rad redovisningar vid olika tidpunkter. Under de närmaste 40 åren kommer SKB att passera ett antal viktiga milstolpar. Detta kapitel handlar om milstolparnas betydelse och hur de relaterar till varandra. Figur 3-1 visar tidsplanen för Loma-programmet.

Milstolparna beskrivs närmare i avsnitt 3.2. Vi har valt att dela upp dem i två kategorier:

- Ansökningar, anmälningar och redovisningar.
- Andra viktiga milstolpar.

En viktig milstolpe för hela Loma-programmet är Fud-program 2010, som kommer att inriktas mot låg- och medelaktivt avfall och rivning. Loma-programmet beskrivs närmare i del VI av detta Fud-program.

Loma-programmet



Figur 3-1. Tidsplan för Loma-programmet.

3.1 Planering

3.1.1 Planering för SFR

Drifttillståndet för slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1) omfattar i dag endast driftavfall. För att i framtiden kunna ta emot de mängder rivningsavfall som beräknas uppstå måste anläggningen byggas ut. Denna utbyggnad har ursprungligen benämnts som slutförvar för rivningsavfall (SFR 3). I samband med utbyggnaden kommer hela SFR 1 och SFR 3 att licensieras om så att både rivnings- och driftavfall ska kunna deponeras. Därmed kan förvaringsvolymerna utnyttjas på ett optimerat sätt. Därefter kommer slutförvaret att benämnas enbart SFR.

Vi planerar att bygga ut SFR i två etapper. Vid den första utbyggnaden kommer hela SFR licensieras för deponering av drift- och rivningsavfall. Utbyggnaden av etapp 1 beräknas vara klar att tas i drift år 2020. Den utbyggnads volymen kommer att baseras främst på följande:

- Mängden rivningsavfall som uppstår vid rivning av Studsviks R2-reaktor, Barsebäck 1 och Barsebäck 2, samt vid en eventuell rivning av Ågestareaktorn.
- Ökad mängd driftavfall på grund av förlängd drifttid.
- Behovet av förvaringsutrymme för stora udda komponenter (framför allt från effekthöjningsprojekt).

I etapp 1 kommer en bergsal att byggas av typ BMA (bergrum för medelaktivt avfall). Övriga bergsalar blir av typ BLA (bergrum för lågaktivt avfall).

Planeringen inför utbyggnaden av SFR har påbörjats under 2007. Platsundersökningar kommer att påbörjas under 2008. Resultaten från undersökningarna kommer att ligga till grund för beslut om var utbyggnaden ska förläggas.

Utbyggnaden av etapp 2 ska stå klar för att ta emot rivningsavfallet från Ringhals, Forsmarks samt Oskarhamns kärnkraftverk då det blir aktuellt. Förläggning av utbyggnad av etapp 2 är ännu inte fastställd.

3.1.2 Planering för BFA

Det långlivade avfallet, som uppkommer vid drift, moderniseringar och rivning av kärnkraftverken, planeras att mellanlagras under torra förhållanden i det befintliga BFA (bergrum för avfall) på Simpevarpshalvön. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring. Drifttillståndet för BFA innehas av OKG. SKB har en avtalad nyttjanderätt i BFA. För att i framtiden kunna utnyttja BFA för mellanlagring av hårdkomponenter från andra kraftverk än OKG krävs en omlicensiering av BFA. Då BFA är OKG:s anläggning ombesörjer OKG uppdateringen av säkerhetsredovisningen samt omlicensieringen, vilket beskrivs i avsnitt 3.3. En ny avfallstransportbehållare, benämnd ATB-1T, håller på att tas fram för att kunna transportera det långlivade låg- och medelaktiva avfallet från andra kraftverk än Oskarshamn till BFA. BFA kommer även delvis att behöva byggas om, med bland annat en ny omlastningsstation. Projektet för att ta fram avfallstransportbehållare ATB-1T pågår, och är den tidsstyrande faktorn inför idrifttagandet av BFA. Mellanlagring av hårdkomponenter i BFA beräknas kunna starta tidigast i slutet av 2011, då leverans av ATB-1T är planerad.

3.1.3 Planering för SFL

Den sista anläggningen som kommer att byggas inom Loma-programmet är slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Målet är att i Fud 2010 kunna redogöra mer detaljerat för hur SKB planerar att projektera anläggningen. Redovisningen kommer bland annat att innehålla en strategi för val av plats och förvarsdjup samt studier av förvarets dimensioner.

Beslut om förläggning av slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att fattas tidigast om ett par decennier, varvid detta fortfarande är en öppen fråga.

3.1.4 Planering för rivning

En arbetsgrupp bestående av representanter från SKB samt kraftbolagen har sedan början av 2000-talet arbetat med att ta fram strategier för avveckling och rivning av kärnkraftverken. Huvudstrategin är att börja riva en anläggning så snart den ställts av för gott. På så sätt undviker man en lång period av så kallad servicedrift. För att kunna uppfylla detta planerar vi att bygga ut SFR för att kunna ta emot kortlivat låg- och medelaktivt avfall från rivningen av blocken. Utbyggnaden av SFR blir klar år 2020. Huvudstrategin kan således inte tillämpas för Barsebäcksverket. Kraftbolagens gemensamma mål inför avvecklingen av kärnkraftverken är att man efter avvecklingen bör utnyttja platsen för framtida energiproduktion eftersom där finns väl utbyggd och värdefull infrastruktur, med elledningar, vägar, hamnar, kylvattenkanaler etc. Vissa byggnader kommer också kunna användas efter att de friklassats. Rivningen av ett block påbörjas inte innan intilliggande block med gemensamma byggnader och/eller system är avställda, alternativt kommer drifttiden att anpassas så att de gemensamma blocken ställs av samtidigt, för att på så sätt undvika en lång servicedriftsperiod. Rivningen påbörjas cirka två år efter att blocket slutligen ställts av. Systemrivning sker först och tar minst tre år. Därefter saneras byggnader och kontaminerade byggnadsdelar rivs, varefter anläggningsplatsen är friklassad att användas till annan verksamhet. En rivningstid på cirka fem år medför att ett block kan förväntas vara friklassat för annan användning cirka sju år efter avställning, se del VI, avsnitt 40.2.2.

3.2 Milstolpar för SFR

3.2.1 Ansökningar, anmälningar och redovisningar

Uppdaterad säkerhetsanalysrapport för SFR 1

En säkerhetsanalysrapport (SAR) för en kärnteknisk anläggning ska uppdateras vart tionde år /3-1/. En uppdaterad SAR för SFR 1 lämnades in 2001. Myndigheternas granskning av denna föranledde behov av komplettering, och SKB uppdaterar för närvarande denna och den uppdaterade säkerhetsanalysrapporten kommer att skickas in till myndigheterna vid årsskiftet 2007/2008.

Ansökan enligt kärntekniklagen

En utbyggnad av SFR samt en omlicensiering av SFR 1 kommer att kräva regeringens tillstånd enligt kärntekniklagen. I ansökan kommer SKB att redogöra för det tekniska underlag som behövs för att bedöma om SFR 1 uppfyller de krav som ställs på anläggningen enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen med tillhörande föreskrifter och förordningar. Ansökan kommer även att innehålla en preliminär säkerhetsrapport (PSAR) och en miljökonsekvensbeskrivning.

Ansökan enligt miljöbalken

Inför utbyggnaden kommer SKB att ansöka om miljödomstolens tillstånd enligt 9 kapitlet miljöbalken (miljöfarlig verksamhet) för hela SFR-anläggningen. Enligt miljöbalkens nuvarande utformning synes det inte möjligt att få en prövning enbart av utbyggnaden (så kallat påbyggnadstillstånd), utan hela SFR kommer troligen att prövas på nytt. I prövningen ingår även en bedömning av hur bortsprängda eller uppgrävda massor ska tas om hand i det fall massorna exempelvis ska föras till deponi eller säljas som fyllnadsmaterial till vägar. Utbyggnaden av SFR kommer även att kräva tillstånd enligt 11 kapitlet miljöbalken (vattenverksamhet).

En förutsättning för att tillstånd enligt miljöbalken ska kunna beviljas är att verksamheten i fråga inte strider mot gällande detaljplan eller områdesbestämmelser enligt plan- och bygglagen. Ärenden enligt plan- och bygglagen kommer att hanteras parallellt med att ovan angivna prövningar förbereds och pågår hos myndigheter, miljödomstol och regering.

Ansökan om drift av utbyggt SFR

Då anläggningarna är uppförda och system och processer fungerat som avsett lämnar SKB in en ansökan om att inleda provdrift. Ansökan kommer att innehålla en uppdaterad analys av den långsiktiga säkerheten, förnyad säkerhetsredovisning (SAR) samt säkerhetstekniska driftförutsättningar.

Provdriften är till för att ta tillvara erfarenheter. Säkerhetsredovisningarna och de säkerhetstekniska driftförutsättningarna kommer då att kompletteras och ingå som underlag i SKB:s ansökan om att få påbörja rutinmässig drift för anläggningarna.

Utbyggnaden av slutförvaret för reaktoravfall kommer att ske i två etapper. Ansökan om provdrift för den utbyggda etapp 1 av SFR kommer att lämnas in tidigast 2018, med målsättning att ta anläggningarna i drift år 2020.

3.2.2 Andra viktiga milstolpar

Platsundersökningar för utbyggnaden av SFR

Platsundersökningar med provborringar och andra undersökningar av berget kommer att påbörjas under 2008.

Platsval för utbyggnaden av SFR

Den exakta placeringen av utbyggnaden av SFR är ännu inte beslutad. Anläggningen kommer dock att ligga i anslutning till det befintliga förvaret. Resultaten från platsundersökningarna kommer att ligga till grund för den exakta placeringen.

Byggstart för utbyggnaden av SFR

När alla erforderliga tillstånd och villkor enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen, miljöbalken och plan- och bygglagen har erhållits kan utbyggnaden börja byggas. Vi kommer då att ta ställning till konsekvenserna av villkoren i tillstånden före byggstart och anpassa planeringen efter dessa.

3.3 Milstolpar för BFA

3.3.1 Ansökningar och anmälningar

Tillståndsfrågorna för BFA hanteras av OKG. OKG fick nytt tillstånd för sin miljöfarliga verksamhet under 2006 och fick då bland annat tillstånd för att utnyttja BFA som en gemensam lagringsplats för hårdkomponenter. Detta betyder att det från miljösynpunkt är tillåtet att mellanlagra hårdkomponenter i BFA. OKG har även skickat in en uppdaterad säkerhetsredovisning (SAR) inklusive säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) för BFA till SKI under 2007. Då den är godkänd av myndigheten finns tillstånd att mellanlagra hårdkomponenter från övriga kärnkraftverk.

3.3.2 Andra viktiga milstolpar

Driftstart för BFA

För att vi på ett effektivt sätt ska kunna använda delar av OKG:s bergrum för avfall (BFA) måste vi ta fram nya avfallsbehållare, nytt fordon, samt installera ny hanteringsutrustning i BFA. Målet är att BFA i Oskarshamn kan ta emot hårdkomponenter placerade i så kallade BFA-tankar med start 2011, samt att det vid samma tidpunkt är möjligt att transportera hårdkomponenterna till BFA.

3.4 Milstolpar för SFL

Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall beräknas stå färdigt för att tas i drift tidigast år 2045. Beslutet om var förvaret ska ligga kommer att fattas om ett par decennier. Fokusering på Loma-programmet och SFL kommer att ske i Fud-programmet 2010.

En avfallsinventering och bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett tänkt förvar genomförs när ansökan om utbyggnad av SFR har lämnats in.

3.5 Milstolpar för rivning

3.5.1 Ansökningar, anmälningar och redovisningar

Båda blocken i Barsebäck är avställda. Barsebäck 2 ställdes av i maj 2005 och övergick den 1 december 2006 till vad som benämns servicedrift. Vid detta tillfälle hade det sista använda kärnbränslet transporterats till Clab. En ny SAR (säkerhetsredovisning) och en ny STF (säkerhetstekniska driftförutsättningar) för servicedrift har lämnats till myndigheterna och tillämpas nu. Det miljötillstånd som erhållits gäller till och med 2012. Ett förnyat tillstånd för servicedrift kräver en ny miljöprövning.

För att få tillstånd för rivning krävs tillstånd från myndigheterna. Vidare ska en prövning göras i miljödomstolen. Enligt nuvarande planer så kommer rivningen att inledas 2020.

Forsmark och Ringhals planerar att driva sina reaktorer i 50 år och OKG i 60 år. Milstolpar för rivningen av dessa kraftverk kommer att presenteras i senare Fud-program.

För omhändertagandet av rivningsavfallet hänvisas till milstolparna för utbyggnaden av SFR, utnyttjandet av BFA för mellanlagring, samt byggandet av slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall.

3.5.2 Andra viktiga milstolpar

Blockspecifika rivningsstudier

SKB tar tillsammans med kraftbolagen fram rivningsstudier med målsättning att successivt ge ett säkrare och mer detaljerat underlag för att bedöma avfallsvolymer, aktivitetsmängderna och avvecklingskostnaderna för respektive kärnkraftverk. Kommande studier baseras på den detaljstudie som har genomförts för referensanläggningen Oskarshamn 3 och på de erfarenheter som erhålls från Barsebäck. Studierna anpassas till de specifika förhållanden som råder vid övriga kraftverk i fråga om det fysiska utförandet av kraftverken och i fråga om tillståndsinnehavarnas planering för att avveckla det egna verket. För PWR-anläggningarna kommer en uppdatering av den befintliga studien för Ringhals 2 att utgöra grunden. Resultaten av studierna ligger dels till grund för dimensionering av framtida slutförvar för rivningsavfall samt för de säkerhetsanalyser för slutförvaret som krävs i tillståndsprocessen. Rivningsstudierna syftar också till att ge förbättrad uppskattning av avvecklingskostnaderna för kärnkraftverken.

Del II

Slutförvaret för använt kärnbränsle

- 4 Nuläge
- 5 Utgångspunkter för uppförande och drift
- 6 Arbetsmetodik under uppförande och drift
- 7 Huvudskede tillståndsprovning
- 8 Huvudskede uppförande
- 9 Huvudskede driftsättning
- 10 Huvudskede drift

4 Nuläge

I denna del av Fud-programmet redovisas planerna för de delar av Kärnbränsleprogrammet som avser slutförvaret för använt kärnbränsle. Redovisningen är strukturerad med utgångspunkt från det stegvisa genomförandet av programmet enligt SKB:s handlingsplan och omfattar huvudskedena till och med rutinmässig drift av anläggningen. Syftet är att ge en helhetsbild av nuläget i planeringen för slutförvaret, så att tillämpningarna av resultaten från forskning, utveckling och demonstration i olika skeden lättare kan överblickas.

Planeringsarbetet för slutförvaret och inkapslingsanläggningen integrerades vid årsskiftet 2006/2007 till ett gemensamt projekt. I enlighet med miljöbalkens bestämmelser pågår samråd med berörda kommuner, myndigheter och andra intressenter som en del av detta projekt. Samråd med myndigheterna sker också i enlighet med särskilda regeringsbeslut /4-1, 4-2/. Resultat, status och planer redovisas successivt och detaljerat inom ramen för dessa samråd. Därigenom får SKB fortlöpande värdefulla synpunkter som kan beaktas i det fortsatta arbetet. Mera översiktliga, men heltäckande, redovisningar av platsundersökningarna finns i de verksamhetsrapporter som publiceras årligen, de senaste för år 2006 /4-3, 4-4/.

Redovisningen av den pågående verksamheten sker alltså huvudsakligen under andra former än genom Fud-programmen. Av det skälet är den statusredovisning som ges i detta kapitel kortfattad. Tonvikten ligger i stället på kommande skeden, då slutförvaret ska uppföras, tas i drift och drivas tills allt använt bränsle från de svenska kärnkraftverken har deponerats.

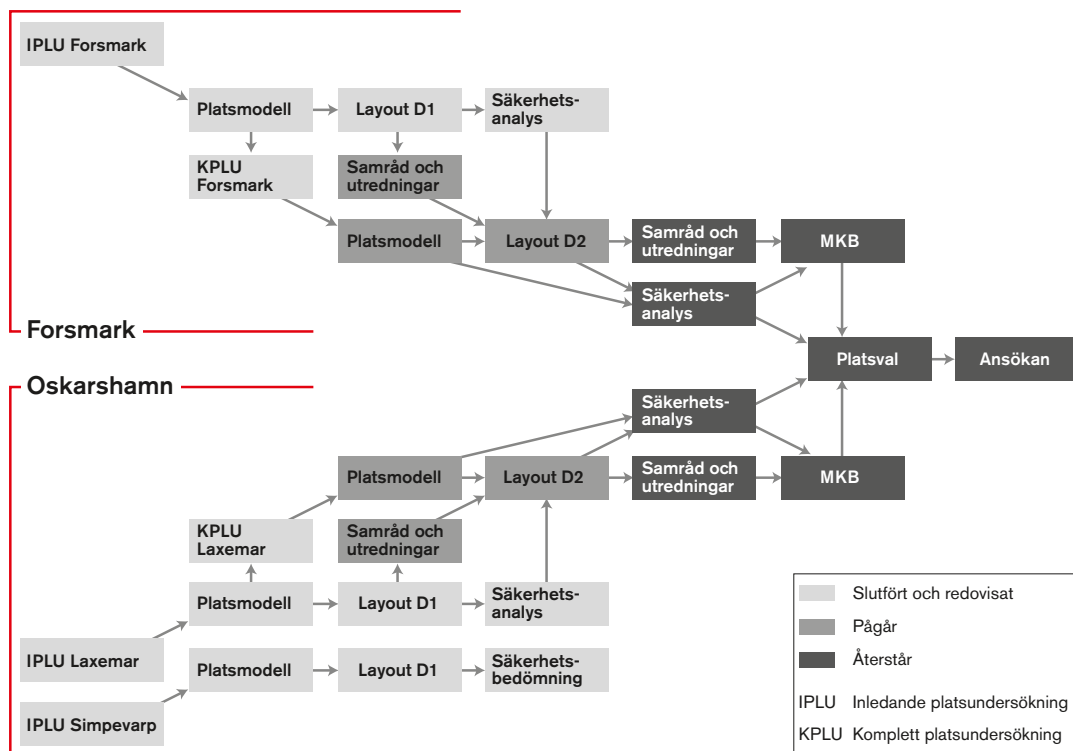
4.1 Lokaliseringsalternativen

Efter mer än fem års omfattande arbete har platsundersökningarna i Forsmark och Oskarshamn i huvudsak avslutats. Innan undersökningarna startade genomförde SKB omfattande förberedelser:

- Undersöknings- och analysmetoder utvecklades och förbättrades.
- Arbets sättet för att samla in, hantera och bearbeta data finslipades.
- Undersöknings- och utvärderingsprogram togs fram och granskades av myndigheterna.
- Arbetsgrupper för modellering, analys och utvärdering av data organiserades, likaså för arbetet med anläggningsutformning och säkerhetsanalyser.
- Platsorganisationer etablerades.

Efter ett inledande skede med en del intrimning fann verksamheten sina former och har sedan löpt effektivt. Nu pågår arbete med att utvärdera data, revidera platsbeskrivningar, ta fram platsanpassade lösningar för förvaret, utreda miljökonsekvenser och förbereda säkerhetsanalysen SR-Site. Båda lokaliseringsalternativen ska enligt planerna drivas så långt att de kan utvärderas i alla relevanta avseenden, var för sig och i relation till varandra. Med det som grund är avsikten att välja en av platserna.

Figur 4-1 ger en överblick över slutförda, pågående och återstående huvudaktiviteter, samt kopplingar mellan dessa, under tiden fram till ansökan. Undersökningar och analyser är iterativa processer och indelade i två huvudetapper – inledande platsundersökning (IPLU) respektive komplett platsundersökning (KPLU). Motsvarande etappindelning gäller för projekteringen av slutförvarets anläggningar där två versioner, betecknade D1 respektive D2, tas fram. Data från IPLU har legat till grund för D1-versionen och för den preliminära säkerhetsanalysen SR-Can. På motsvarande sätt kommer data från KPLU att ligga till grund för de slutgiltiga projekteringsresultaten (D2) och för säkerhetsanalysen SR-Site. Själva datainsamlingen på plats har skett med mera frekventa avstämningsspunkter – så kallade datafrysar. Detsamma gäller de olika versioner av platsbeskrivningar som tagits fram.



Figur 4-1. Utförda, pågående och återstående huvudaktiviteter under platsundersökningsskedet.

Data från undersökningarna ger tillsammans med projekteringsresultaten underlag för att utreda miljöfrågor. Detta arbete bedrivs fortlöpande, och omfattar dagens förhållanden samt bedömningar av de konsekvenser som etableringen av ett slutförvar kan ge i olika skeden. Genomförda utredningar beskriver bland annat konsekvenserna av bygge, drift och transporter för natur- och kulturmiljö, landskapsbild, rekreation och friluftsliv. Konsekvenser för boendemiljö och hälsa kommer att bedömas och redovisas när tillräckligt underlag finns framtaget. Miljöbedömningarna uppdateras i takt med att planeringen av slutförvaret framskrider. Omvänt gäller att resultaten från miljöutredningarna kan återföras till projekteringen som underlag för att anpassa anläggningar, infrastruktur och verksamhet så att konsekvenserna för miljön begränsas. Skadeförebyggande åtgärder och kompensationsåtgärder tas fram för att minimera påverkan.

Vid sidan av undersökningarna har lokal informations- och kontaktverksamhet varit en huvuduppgift för platsorganisationerna. En stor mängd besökare av alla kategorier har på plats tagit del av verksamheten. Stor vikt har lagts vid kontakterna med markägare och närboende som direkt berörs av undersökningarna, för att på bästa sätt förena verksamheten med andra intressen, reglera ersättningsfrågor etc.

Kontakterna med respektive kommun och länsstyrelse har också utgjort centrala arbetsuppgifter. Alltsedan förstudierna och starten av platsundersökningarna följer Oskarshamns och Östhammars kommuner aktivt vår verksamhet genom egna organisationer och arbetsgrupper och bedriver därutöver kompetensuppbyggnad och informationsverksamhet i egen regi. Vi samverkar också med kommunerna när det gäller frågor om lokal samhällsutveckling och hur ett slutförvar skulle påverka denna utveckling.

För båda lokaliseringsalternativen gäller att dagens planförhållanden inte skulle medge att ett slutförvar byggs på de aktuella platserna. Planfrågor regleras i plan- och bygglagen, och är den berörda kommunens ansvar. I båda fallen har kommunerna initierat beslutsprocesser för att genomföra de planregleringar som erfordras.

SKB:s platsorganisationer har omfattat cirka 35 personer på vardera platsen. I och med att undersökningarna avslutas minskas personalstyrkan radikalt. Vi bibehåller emellertid resurser för att på plats kunna sköta information och samhällskontakter, liksom långtidsmätningar (monitering), allmänt underhåll och beredskap för kompletterande undersökningar.

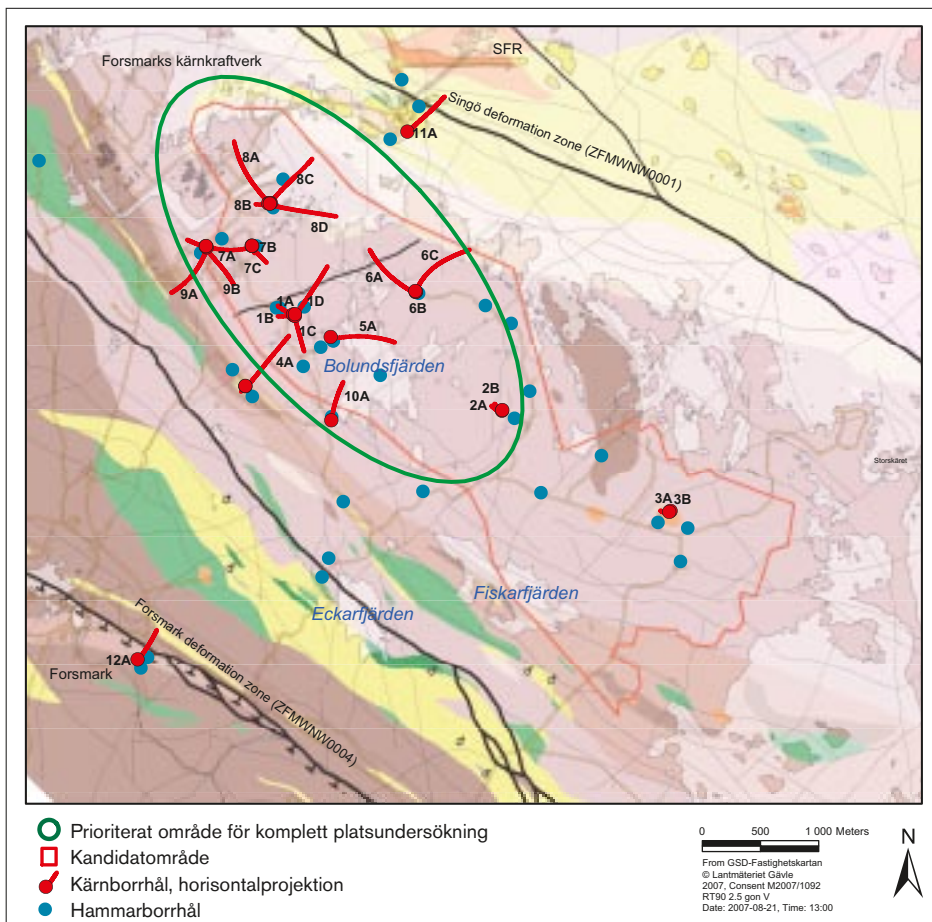
4.1.1 Forsmark

Undersökningar

Undersökningarna i Forsmark inleddes 2002 och avslutades i princip under sommaren 2007. Inför starten upprättades ett undersökningsprogram som i huvudsak omfattade den inledande delen av platsundersökningen (IPLU) /4-5/. Programmet utgick från det cirka tio kvadratkilometer stora område sydost om Forsmarks kärnkraftverk som tidigare rekommenderats för en platsundersökning – det så kallade kandidatområdet, se figur 4-2. Fokus för undersökningarna låg på att besvara generella och platsspecifika frågor som sågs som avgörande för att bedöma platsens lämplighet.

När den inledande undersökningsetappen genomförts och en preliminär platsbeskrivande modell tagits fram gjordes en avstämning av kunskapsläget mot de grundläggande krav som redovisats innan platsundersökningarna inleddes, och som måste kunna visas vara uppfyllda för att en plats ska vara av intresse för slutförvaret /4-6/. Slutsatsen blev att platsen uppfyllde kraven och att fortsatta undersökningar därmed var motiverade, något som senare verifierats av den preliminära säkerhetsanalysen SR-Can /4-7/. Avstämningen gav också underlag för att identifiera kvarstående databehov, liksom strategi och program för fortsatta undersökningar.

Med detta som grund upprättades ett program för den avslutande delen av platsundersökningen (KPLU) /4-8/. Den strategi som valdes innebar att den nordvästra delen av kandidatområdet prioriterades, se figur 4-2. Undersökningarna hade redan i ett tidigt skede indikerat att såväl den



Figur 4-2. Kandidatområde, prioriterat område för komplett platsundersökning och borrhållslägen i Forsmark.

nordvästra som den sydöstra delen av kandidatområdet hade berggrund som motiverade fortsatta undersökningar. Den skillnad som ändå kunde noteras var en högre frekvens av flacka, vattengenomsläppliga sprickzoner i den sydöstra delen. Huvudmotiven för att då prioritera den nordvästra delen var att:

- Preliminära studier av utrymmesbehov och möjliga lägen visade att ett förvar med stor sannolikhet kunde inrymmas inom den nordvästra delen.
- Läget delvis under industriområdet möjliggjorde en förvarsutformning med markförlagda anläggningar inrymda på befintlig industrimark. Detta bedömdes ge en rad tekniska och miljömässiga fördelar.

De undersökningar som programmet omfattade inriktades på att:

- Bestämna de geologiska gränserna för tillgänglig bergvolym på förvarsdjup.
- Karakterisera tillgänglig bergvolym till den omfattning och detaljeringsnivå som krävs.
- Karakterisera den prioriterade platsens hydrauliska randområden.

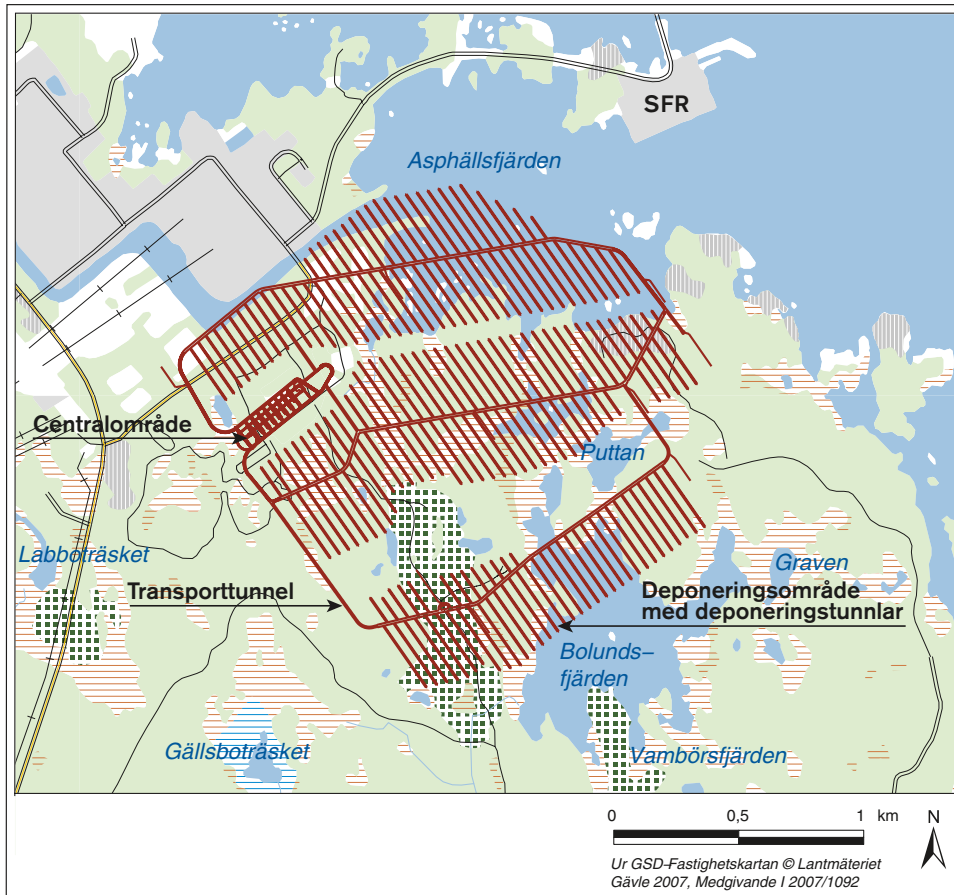
Strategi, omfattning och inriktning för undersökningarna som redovisats i undersökningsprogrammen har i stort sett kunnat följas. De förändringar som gjorts har i huvudsak varit justeringar av borrhållslägen, undersökningssekvenser eller tidsplaner, föranledda av successivt erhållna resultat eller praktiska omständigheter. Tillkommande, större insatser är avsevärt mera omfattande bergspänningsmätningar än vad som förutsågs från början, samt ett kärnborrhål i ett sent skede. Bergspänningarna i området har visat sig vara relativt höga, vilket skärper kraven på dataunderlag för att kunna utforma förvarets bergutrymmen så att goda stabilitetsförhållanden uppnås. Detta tillsammans med begränsningar i mätmetodernas tillämpbarhet motiverade de extra insatserna för att bestämma bergspänningarna och deras variation. Det tillkommande kärnborrhålet syftade till att klarlägga betydelsen av resultat från markgeofysiska undersökningar.

Platsbeskrivningar

Platsbeskrivande modeller för Forsmark har publicerats enligt plan /4-9, 4-10, 4-11/. Den preliminära platsbeskrivande modellen (version 1.2) motsvarar resultaten från IPLU och låg till grund för projekteringssteget D1, preliminära säkerhetsbedömningar /4-12/ och säkerhetsanalysen SR-Can /4-7/. Under den avslutande delen av platsundersökningen (KPLU) genomförs tre modelleringssteg, varav det första har avrapporterats. Huvudsyftet med det första steget (version 2.1) var att ge återkoppling till undersökningarna på platserna för att säkerställa effektiv informationsinhämtning under återsoden av platsundersökningen. Utöver detta uppdaterades den geologiska modellen för litologi och deformationszoner, men ingen komplett integrerad platsbeskrivande modell togs fram. För närvarande slutförs arbetena inom modellsteg 2.2 med uppdaterade modeller för platsens geologi, bergmekaniska och termiska egenskaper samt hydrogeologi och transportegenskaper. Dessa modeller blir utgångspunkt för projekteringssteget D2 och för modellsteget 2.3, vars produkt är en slutlig integrerad platsbeskrivande modell som har fått benämningen SDM-Site Forsmark. Den integrerade modellen planeras bli klar tidigt under 2008. Tillsammans med resultaten från projekteringen i skede D2 kommer den att ligga till grund för säkerhetsanalysen SR-Site. Dataunderlaget är nu betydligt mera omfattande än vad som var fallet för version 1.2, särskilt vad gäller förhållanden på förvarsdjup. Den preliminära bedömningen är att detta inte kommer att förändra bilden av platsen i något avgörande avseende.

Anläggningsutformning

Projekteringen av ett slutförvar i Forsmark bygger på att själva förvaret kan förläggas inom det prioriterade området enligt figur 4-2, samtidigt som anläggningar och verksamhet ovan mark i huvudsak ska kunna inrymmas inom det befintliga industriområdet. Med detta som utgångspunkt har olika utformningsförslag tagits fram och utvärderats. Projekteringen i skede D1 resulterade i en preliminär layout för ett förvar på 400 meters djup och med utbredning enligt figur 4-3 /4-13/. För systemutformningen, det vill säga lägen för anläggningar ovan mark och lösningar för kommunikationen mellan dessa och förvaret, togs två alternativa förslag fram. I det ena förlades huvuddelen av anläggningarna i anslutning till SFR-anläggningen. I det andra alternativet samlades anläggningarna



Figur 4-3. Preliminär layout för ett slutförvar i Forsmark (Layout D1).

till ett driftområde öster om infarten till Forsmark, på den södra delen av industriområdet (där det i dag finns en barackförläggning för tillfälligt boende). Efter en jämförande värdering /4-14/ prioriterades läget vid infarten. Ett viktigt argument var att detta område ligger ”rätt” i förhållande till förvarets centralområde för att bergtransporter ska kunna ske via ett vertikalt skipschakt. Detta ger betydande driftstekniska fördelar i förhållande till en utformning där alla tunga transporter måste gå via ramp. Andra argument för valet var bättre tillgång till ytor för hantering av bergmassor och totalt sett mindre transportbehov. Figur 4-4 visar ett fotomontage av planerade, markförlagda anläggningar.

För närvarande pågår projekteringskedet D2, som innebär att utformningen av förvarets alla delar revideras och detaljeras med beaktande av de data som tillkommit. En föreslagen förändring är att förvarsdjupet ökas från antagna 400 meter till 450–500 meter. Motiven för detta är att bergspänningarna uppvisar en lägre ökningstakt mot djupet än vad som antogs inledningsvis, samt att mönstret av sprickzoner på platsen ger gynnsammare förutsättningar för att placera ut slutförvarets deponeringsområden inom det nu föreslagna djupintervallet.

Preliminär säkerhetsanalys

Den preliminära säkerhetsanalysen SR-Can /4-7/, som bygger på resultaten från den inledande platsundersökningen och motsvarande platsmodell /4-10/, anger att ”ett KBS-3-förvar vid Forsmark kommer att uppfylla SSI:s riskkriterium. Osäkerheterna är dock betydande i den hydrogeologiska tolkningen och förståelsen för Forsmark. När dessa osäkerheter propageras till olika delar av analysen leder det till ett brett spann av möjligheter kring till exempel utsläpp av buffertkolloider och vattenflödets egenskaper. En minskning av dessa osäkerheter skulle tillåta säkrare slutsatser i framtida analyser. Även den mest pessimistiska tolkningen av Forsmark bedöms dock uppfylla SSI:s riskkriterium.”



Figur 4-4. Fotomontage som visar slutförvarets markförlagda anläggningar inplacerade på södra delen av industriområdet i Forsmark (Layout D1).

De undersökningar som utförts därefter har värderats som ett led i den löpande platsmodelleringen /4-11/. Slutsatsen är att osäkerheterna har reducerats väsentligt. De borrhål som tillkommit inom det planerade förvarsområdet, liksom resultaten av detaljerade ytbaserade geofysiska undersökningar, bekräftar i stor utsträckning den bild av platsen som redovisades redan efter den inledande platsundersökningen. Läget och karaktären hos de layoutstyrande deformationszonerna har enbart modifierats i detalj. Samtliga borrhål visar att frekvensen av vattenförande sprickor på nivåer under cirka 350 meter är mycket låg.

Omfattande insatser har gjorts för att, med hjälp av direkta och indirekta metoder, förbättra kunskapen om bergspänningarna. Detta har ökat tillförlitligheten vid bedömningarna av spännings-tillståndet. Det är svårt att komma längre i denna viktiga fråga, givet de begränsningar som ytbaserade undersökningar innebär.

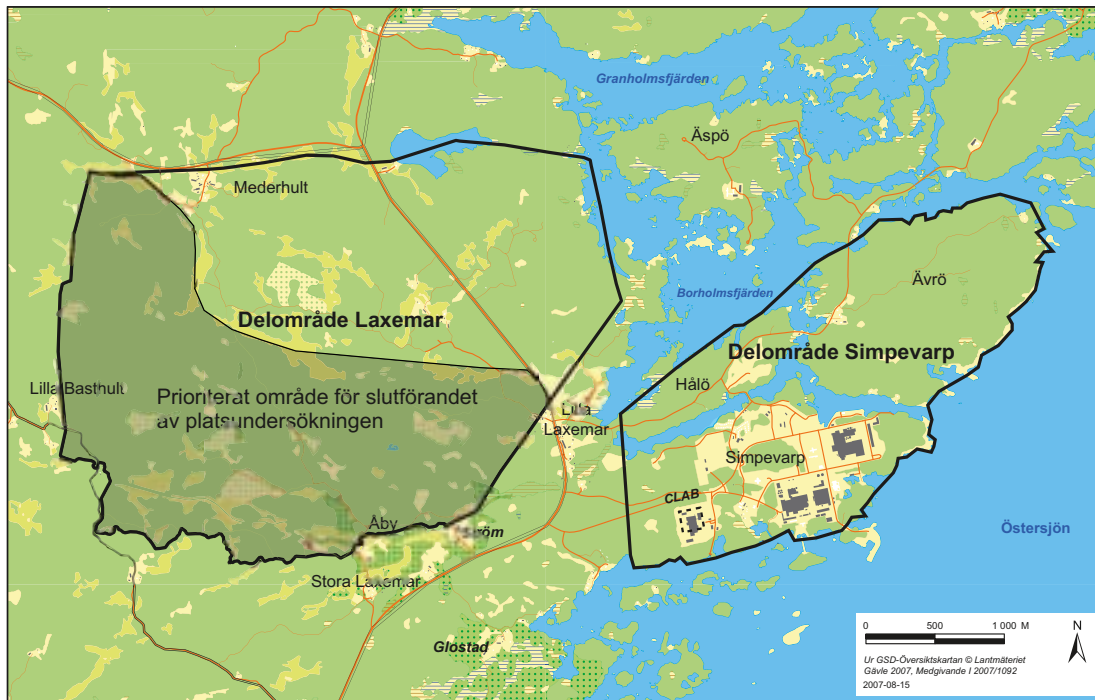
4.1.2 Laxemar

Undersökningar

Undersökningarna i Laxemarområdet avslutas under första kvartalet 2008. Undersökningarna har i slutfasen koncentrerats till ett cirka sex kvadratkilometer stort område, se figur 4-5, som prioriterats för ett eventuellt slutförvar. Prioriteringen är resultatet av successiva avgränsningar som gjorts inför och under platsundersökningen.

Ett program för inledande platsundersökning av Simpevarpsområdet redovisades hösten 2002 /4-15/ och omfattade det cirka 60 kvadratkilometer stora område som rekommenderades som ett resultat av förstudien. På Simpevarpshalvön, som utpekats separat i förstudien, inleddes omedelbart borrhningar. Resultaten indikerade bergförhållanden som kunde uppfylla kraven för ett slutförvar. Det begränsade utrymmet på halvön motiverade att området utökades till att omfatta även Ävrö, Hålö och näraliggande vattenområden ("delområde Simpevarp" enligt figur 4-5), varefter en inledande platsundersökning på detta område fullföljdes.

Väster om Simpevarp startade undersökningarna med helikopterburna geofysiska mätningar, fältkontroller etc över ett väsentligt större område än det som visas i figur 4-5. Med detta som underlag identifierades ett flertal områden med bergförhållanden som bedömdes motivera fortsatta



Figur 4-5. Delområden för inledande platsundersökning samt prioriterat område för slutförandet av platsundersökningen i Laxemar.

undersökningar och stora nog att med god marginal inrymma ett slutförvar /4-16/. Det område som visas i figur 4-5 – cirka nio kvadratkilometer stort och benämnt ”delområde Laxemar” – prioriterades inför fortsättningen. Flera andra områden bedömdes likvärdiga från geologisk synpunkt, och närheten till Simpevarpshalvön var huvudargumentet för att då välja delområde Laxemar. Med start i början av 2004 genomfördes en inledande platsundersökning på delområde Laxemar, sedan överenskommelser kunnat träffas med berörda markägare.

Nästa milstolpe var att prioritera ett av delområdena Simpevarp eller Laxemar, för en komplett platsundersökning. I samband med att de inledande undersökningarna slutfördes prioriterades preliminärt Laxemarområdet. Det underlag för jämförelser som senare tillkom i form av platsbeskrivningar, projekteringsresultat (skede D1) och säkerhetsbedömningar för båda områdena ändrade inte den preliminära bedömningen och ett definitivt beslut att gå vidare med Laxemar kunde fattas. Huvudargumenten för att välja Laxemarområdet kan sammanfattas i följande punkter /4-17/:

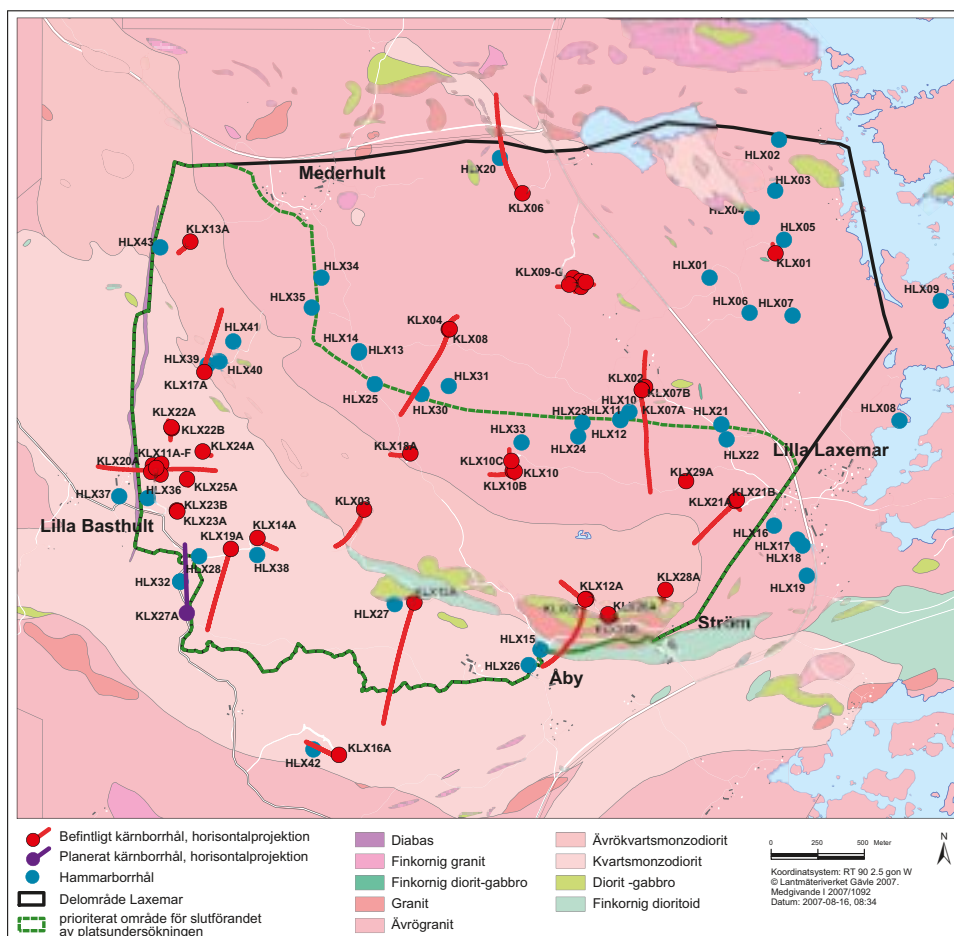
- Båda områdena kan troligen inrymma ett förvar, men i fallet Simpevarp är marginalerna små. I fallet Laxemar finns gott om utrymme och därmed stora marginaler. Detta ger flexibilitet för framtida förändringar av förvarslayouten och goda möjligheter att hantera eventuella geologiska överraskningar, även i sena skeden.
- De säkerhetsbedömningar som redovisats indikerar att båda områdena uppfyller kraven. Den mera homogena berggrund som präglar delar av Laxemarområdet kan dock ge fördelar i form av jämförelsevis låg sprickfrekvens och dito vattenföring. Den större flexibiliteten i fallet Laxemar bidrar också till möjligheterna att anpassa ett förvar så att alla säkerhetskrav kan visas vara uppfyllda.
- Ett förvar i Laxemar innebär nyetablering av markförlagda anläggningar och infrastruktur på skogsmark, med åtföljande påverkan på miljön. Simpevarp är däremot planlagd industrimark och miljön präglas av den befintliga industriverksamheten. Å andra sidan är tillgången på lämpligt belägen mark inom industriområdet begränsad och för andra delar av Simpevarpsområdet finns naturskyddsintressen som begränsar exploateringsmöjligheterna. Områdenas för- och nackdelar med avseende på miljöförhållanden är svåra att jämföra, men båda alternativen bedöms vara fullt godtagbara.

Inför den kompletta platsundersökningen krävdes en reducering av undersökningsområdets storlek inom delområde Laxemar, men informationen om berggrundens egenskaper var inte tillräcklig för att medge en väl grundad fokusering. Därför genomfördes först ett undersökningssteg för att få fram det underlag som behövdes /4-18/. Därefter upprättades ett program för den kompletta undersökningsetappen /4-19/. Undersökningarna har successivt inriktats mot områdets södra och västra delar, se figur 4-5. Skälet är variationer i berggrundsförhållanden inom området. I söder och väster dominerar kvartsmonzodiorit, som visat sig vara mera homogen och sprickfattig än den berggrund som dominerar områdets norra och östra delar. Figur 4-6 visar lägen för de undersökningshål som borrats i Laxemalområdet.

De undersökningsinsatser som angavs i programmet /4-19/ har genomförts. Beslut har fattats om ett kompletterande kärnborrhål med huvudsyfte att undersöka betydelsen av en förmodad deformationszon i områdets södra del, samt berggrunden på försvarsdjup norr om denna zon. Borrningen av detta hål kommer att ske under hösten 2007, varefter platsundersökningen avslutas med ett verifierande pumptest.

Platsbeskrivningar

Platsbeskrivande modeller baserade på de inledande undersökningarna har redovisats för båda delområdena /4-20, 4-21/. Dessa modeller (version 1.2) låg till grund för preliminära platsanpassade försvarslayouter (version D1) och preliminära säkerhetsbedömningar /4-22, 4-23/. Två modellsteg genomförs under den avslutande delen av platsundersökningen. Huvudsyftet med det första steget (version 2.1 /4-24/) var att, på samma sätt som i fallet Forsmark, ge återkoppling till undersökningarna för att säkerställa effektiv informationsinhämtning under återstoden av platsundersökningen.



Figur 4-6. Delområde Laxemar med prioriterat område för slutförandet av platsundersökningen samt borrhållslägen.

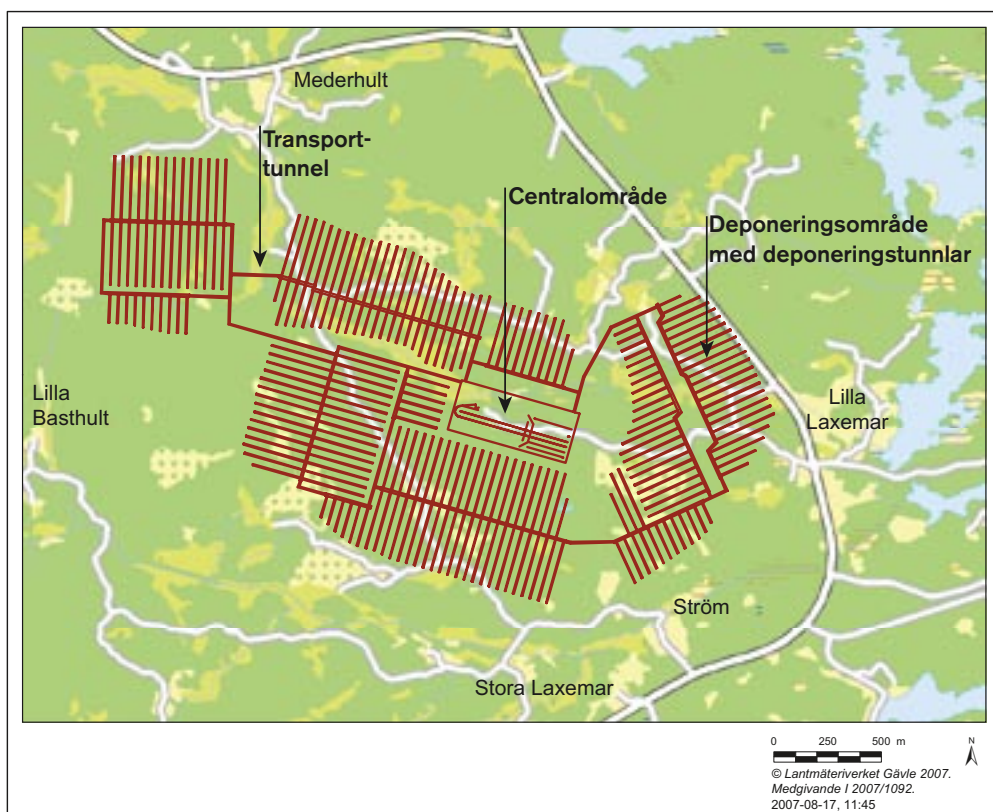
Utöver detta uppdaterades de hydrogeokemiska och termiska modellerna, men ingen komplett integrerad platsbeskrivande modell togs fram. För närvarande genomförs de slutliga modellarbetena med uppdaterade modeller för platsens geologi, bergmekaniska och termiska egenskaper samt hydrogeologi och transportegenskaper. Dessa modeller utgör underlag för projekteringssteget D2 och för modellprojektets slutprodukt, som är en slutlig integrerad platsbeskrivande modell benämnd SDM-Site Laxemar. Den integrerade modellen planeras bli klar i slutet av 2008. Tillsammans med resultaten från projekteringen i skede D2 kommer den att ligga till grund för säkerhetsanalysen SR-Site. Dataunderlaget från de sydvästra delarna av Laxemar är nu betydligt mera omfattande än vad som var fallet för version 1.2, särskilt vad beträffar egenskaperna hos den dominerande kvartsmonzodioriten.

Anläggningsutformning

Den preliminära förvarslayout som togs fram för delområde Simpevarp visade som nämnts att ett förvar troligen kunde inrymmas, men med små marginaler och kvarstående frågetecken vad beträffande utrymme. Detta hade betydelse för beslutet att prioritera Laxemar. I och med detta beslut bortföll också de tänkbara lägen för förvarets markförlagda anläggningar på Simpevarpshalvön, alternativt Hälö, som utretts i tidigare skeden.

För Laxemarialternativet utarbetades en preliminär layout för ett förvar på 500 meters djup efter den inledande platsundersökningen /4-25/, se figur 4-7. I och med att undersökningarna senare förskjutits mera mot de södra och västra delarna av området har förutsättningarna för projekteringen ändrats och stora förändringar av layouten kan förväntas som resultat av det fortsatta arbetet.

Utvecklingen av systemutformningen för slutförvaret har lett fram till en referensutformning där anläggningarna ovan mark samlas till ett driftområde placerat ovanför förvarets centralområde /4-26/. Detta möjliggör vertikala schakt för bland annat berguppfordring. Denna referensutformning är utgångspunkten i arbetet att välja en plats för ett driftområde i Laxemar och anpassa anläggningarna till denna plats. Det innebär bland annat att lösningar där delar av anläggningarna förläggs inom befintligt industriområde på Simpevarpshalvön, och återstoden vid ett slutförvar i Laxemar, kunnat uteslutas.



Figur 4-7. Preliminär layout för ett slutförvar i Laxemarområdet (Layout D1).



Figur 4-8. Vy över delar av Laxemarområdet med ett fotomontage av tänkta, markförlagda anläggningar och bergupplag för slutförvaret vid Oxhagen samt Simpevarpshalvön i bakgrunden.

Med dessa förutsättningar har olika förslag på lägen för ett driftområde skisserats och värderats /4-17/. Bergförhållandena för tillfarter och centralområde är en viktig faktor att väga in dessa värderingar. Möjligheterna att prioritera och precisera ett läge har därför varit avhängigt den till en början knapphändiga geologiska informationen. I takt med att data från den pågående kompletta platsundersökningen blivit tillgängliga har emellertid en plats kunnat preciseras. Platsen benämns Oxhagen och ligger cirka två kilometer väster om Simpevarp. Figur 4-8 visar hur slutförvarets anläggningar och bergupplag kan inplaceras på denna plats. Parallellt med att driftområde och anläggningar vid Oxhagen projekteras utreds alternativ för väganslutningar och annan infrastruktur som behöver nyanläggas. En speciell fråga är transporterna av kapslar från en inkapslingsanläggning vid Clab till förvaret vid Oxhagen. Sträckan är drygt två kilometer och transporterna planeras ske på en nyanlagd enskild väg som i huvudsak följer en kraftledningsgata.

Preliminär säkerhetsanalys

Säkerhetsbedömningen för Simpevarpsområdet har kommenterats ovan. Beträffande Laxemar anger den preliminära säkerhetsanalysen SR-Can /4-7/ att ”den platsbeskrivande modellen version 1.2 för Laxemar inte är tillräckligt representativ för den potentiella förvarsvolymen för att möjliggöra definitiva slutsatser om kravuppfyllelse”. Detta resultat är en konsekvens av dels att underlaget för SR-Can var begränsat, dels att intresset därefter fokuserats mot de södra och västra delarna av området. För att Laxemar ska bli en lämplig plats för ett slutförvar behöver framför allt osäkerheterna i den hydrogeologiska beskrivningen reduceras. De undersökningar som gjorts i senare skeden har gett ett mer representativt underlag från de delar av Laxemarområdet som prioriteras. De data som tillkommit har i huvudsak bekräftat bilden av Laxemar utifrån den inledande delen av platsundersökningen, men visar också på lägre sprickfrekvens och lägre vattengenomsläpplighet i de södra och västra delarna av området jämfört med de data som låg till grund för SR-Can. Det finns också skillnader i bergets termiska egenskaper, men detta påverkar i första hand förvarets utformning.

De kvarstående osäkerheterna i Laxemar bedöms dock vara större än motsvarande osäkerheter i Forsmark. Orsaken är berggrundens större heterogenitet i Laxemar. Osäkerheterna gäller till exempel frågor om den maximala utbredningen av kvartsmonzodioriten och det exakta läget och bredden för vissa layoutstyrande deformationszoner. Det tillkommande undersökningshål som beslutats förväntas bidra med värdefull information om detta. Det kan också i något skede behövas ytterligare ytbaserade undersökningar för att vi i detalj ska kunna bestämma vilka områden som är lämpligast för de senare etapperna i slutförvarets utbyggnad. De data som finns bedöms dock ge tillräckligt underlag för att planera förvarets tillfarter och inledande deponeringsområden och för att bedöma om tillgängliga bergvolymen är stora nog för förvarets senare etapper.

4.2 Återkoppling från platsundersökningarna till Fud-arbetet

4.2.1 Undersökningar

Platsundersökningarna kunde starta utifrån en gedigen kunskapsbas vad avser geovetenskapliga undersökningar. Som en följd av de delvis branschunika behoven har strategier, metoder och instrument för ytbaserade undersökningar utvecklats och tillämpats allt sedan starten av kärnavfallsprogrammet. Grunden lades under typområdesprogrammet. Den senare etableringen av Äspölaboratoriet innebar en uppdatering av tekniken och en direkt generalrepetition inför platsundersökningarna. Inför platsundersökningarna inventerades även undersökningsteknik som hittills inte använts av SKB och tillfördes vid behov de program som lades fast.

Ämnesområdet ytnära ekosystem ingick varken i typområdesundersökningarna eller i undersökningarna för att bygga Äspölaboratoriet. Inför platsundersökningarna utfördes därför ett omfattande arbete för att identifiera vilka förhållanden och egenskaper hos de ytnära ekosystemen som behövde bestämmas, tänkbara karakteriseringsmetoder och lämpliga modeller för platsmodelleringen.

Med facit från platsundersökningarna till hands kan vi nu konstatera att metodik och teknik för såväl de geovetenskapliga undersökningarna som undersökningarna av ytnära ekosystem i allt väsentligt fungerat som planerat. Överraskningarna har varit få och av begränsad betydelse. Det utvecklingsarbete som bedrivits har med få undantag handlat om uppdateringar och finslipning av befintlig teknik. Platsundersökningarna har också – än en gång – understrukit vikten av att metodik och teknik för undersökningar anpassas till platspecifika förhållanden.

Två mätmetoder bör nämnas för vilka kvalitetsbrister av betydelse upptäckts och åtgärdats under undersökningarnas gång. Det gäller mätning av borrhålsavvikelse samt orientering av strukturer (sprickor, bergartskontakter etc) med hjälp av borrhåls-TV (Bips-mätningar). Metodiken för avvikelsemätning har vidare utvecklats genom att två oberoende mätmetoder används och beräkning av mätosäkerheter införts. Problemen med Bips-tekniken gällde brister i orienteringen av registrerade strukturer. Sedan detta blev känt har omfattande efterkontroller av rådata genomförts. I vissa fall har jämförelser gjorts med oberoende mätmetod. Även för denna metod har rutiner för att beräkna osäkerheter utvecklats och implementerats.

På ett par områden har platsundersökningarna inneburit en markant kvalitetshöjning. Det gäller styrningen av det operativa genomförandet med program och rutiner (aktivitetsplaner och metodbeskrivningar) samt informationsflödet från mätning till arkiv, det vill säga insamling, bearbetning, kontroll och redovisning av data, överföring till databaser etc. Verktygen och rutinerna som utvecklats och implementerats för att kvalitetssäkra hanteringskedjorna har förändrat arbetssättet och avsevärt höjt kvaliteten. Denna kunskap blir en viktig tillgång i kommande skeden av slutförvarsprojektet.

Sammantaget finns alltså en god och aktuell kompetens för undersökningar. Det är viktigt att denna kan bibehållas inför kommande skeden. Kompletteringar av metoder och instrument krävs inför undersökningarna under uppförande och drift av slutförvaret. Behoven därvidlag redovisas i del III, kapitel 12. Ett nytt inslag blir att undersökningarna då ska utföras i underjordsmiljö och integrerat med projektering och bergarbeten. Erfarenhet av detta finns från bland annat Äspölaboratoriet, men det finns ändå skäl att understryka de tillkommande krav som detta innebär, bland annat i form av en effektiv återkoppling till byggprocessen.

4.2.2 Modeller för platsbeskrivning

Inför platsundersökningarna redovisades en övergripande strategi för att utvärdera platsspecifik information och utveckla platsbeskrivande modeller i en iterativ process /4-27/. Strategin provades på då tillgängliga data från Laxemarområdet /4-28/. Den övergripande strategin visade sig fungera väl, medan utvecklingsbehov kunde identifieras inom de olika ämnesområdena, liksom för övergripande integration. Med ledning av detta vidareutvecklades metodiken för platsmodellering inom ett flertal ämnesområden.

Med detta som grund gjordes bedömningen att de ytterligare behov av metodutveckling som kunde förutses hanterades bäst som en del i den stegvisa modelleringsprocessen. Det är under det praktiska arbetet som nya möjligheter att analysera data, användarnas behov och svårigheter i kommunikation mellan olika ämnesområden bäst identifieras.

När huvuddelen av platsundersökningsskedets modelleringsarbete nu är genomfört kan vi konstatera att den valda strategin och de metoder som togs fram i hög utsträckning har kunnat tillämpas. Den ytterligare utveckling som krävts och genomförts har främst avsett de mer detaljerade analysmetoderna. Det har inte funnits några nämnvärda behov av att utveckla nya numeriska beräkningskoder. I regel har väl beprövade beräkningsverktyg kunnat användas. Det är i stället vid valet av verktyg och hur dessa används som viss utveckling har skett. Följande exempel kan nämnas:

- Som förväntat har den geologiska modelleringen delvis fått anpassas till plats specifika förhållanden. Exempelvis innebär det relativt tjocka jordtäckets i Forsmark att topografiska lineament har en svag korrelation till deformationszoner, medan det jämförelsevis ringa jordtäckets i Laxemar gör att topografiska lineament där är mycket viktiga element i den strukturgeologiska tolkningen. Reflektionsseismik har visat sig vara ett ännu viktigare verktyg än vad som förutsågs för att, tillsammans med borrhålsinformation, identifiera subhorisontella deformationszoner.
- Inför de avslutande modellstegen har metodiken för att simulera sprickor (DFN-modelleringen) modifierats för att bättre motsvara användarnas behov och på ett mer försvarbart sätt kvantifiera osäkerheterna i den resulterande beskrivningen.
- Metodiken för termisk modellering har uppdaterats, i syfte att bättre beskriva de termiska egenskapernas rumsliga variation och korrelationen med bergarter.
- Metodiken för den hydrogeologiska modelleringen och dess integration med den hydrogeokemiska modelleringen har utvecklats. Den reviderade metodiken lägger ökad vikt vid konceptuella beskrivningar utifrån observationer från olika ämnesområden.
- I senare modellversioner läggs mer tonvikt på att få en samstämd geologisk, bergmekanisk och hydrogeologisk beskrivning av bergets sprickgeometri, spänningssituation och hydrauliska egenskaper. Det har dock funnits liten – eller ingen – anledning att använda så kallade kopplade modellkoder.

Metodiken för att modellera ämnestransport i ytsystemet har platsanpassats och förfinats under arbetet med de första platsbeskrivningarna. Utifrån platsdata har ekosystemmodeller tagits fram för land, sjö och hav. Vidare har metodiken för att beskriva flöden och omsättning av ämnen på landskapsnivå vidareutvecklats. Preliminära resultat från platsbeskrivningarna av ytsystemen visar på möjliga transportvägar från berget, upp till ytan och vidare i ekosystemen. Detta är viktig information för säkerhetsanalysens dosmodellering och sätter fysiska gränser för omsättning och ackumulation av material i ekosystemen.

Den analysmetodik som fortlöpande utvecklats under platsundersökningsskedet förväntas i stor utsträckning vara tillämpbar även i samband med uppförande och drift. Även fortsättningsvis kommer vidareutveckling att behövas, i takt med att nya erfarenheter görs. Det är därför motiverat att se över och revidera nuvarande metodbeskrivningar inför uppförandeskedet. Denna revision görs lämpligen efter det att tillståndsansökan har lämnats in.

Det finns också anledning att se över verktyg och metodik för visualisering och geometrisk modellering (RVS), så att dessa blir mer allmänt utnyttjade för att snabbt bygga upp konceptuella modeller. Vidare behöver praktisk metodik tas fram för att på ett effektivt sätt kunna utvärdera de nya mer detaljerade tester som kan göras under jord. Det gäller till exempel metodik för att tolka mellanhålstester och utvärdera föreslagna acceptanskriterier för deponeringshåll.

4.3 Samlad utvärdering och platsval

4.3.1 Kunskapsläge efter platsundersökningarna

I den samlade redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet /4-29/, som presenterades år 2000, anges att det underlag som tas fram i platsundersökningsskedet ”ska nyttjas för att utvärdera undersökta platser lämplighet för slutförvaret och ska vara tillräckligt omfattande för att:

- *Visa hur den valda platsen uppfyller krav på säkerhet och tekniska förutsättningar.*
- *Kunna ligga till grund för anpassning av slutförvaret till platsens förutsättningar med acceptabel inverkan på miljö och samhälle.*
- *Möjliggöra jämförelser med andra platser som undersökts.”*

SKB gör bedömningen att de undersökningar som nu slutförs ger det underlag som behövs för att uppfylla dessa krav. Det gäller både Forsmark och Laxemar. Det återstår visserligen ett betydande analysarbete innan data från de avslutande etapperna av undersökningarna omsatts till platsanpassade förvarslösningar och säkerhetsanalyser. Att detta skulle förändra den preliminära bedömningen att platsundersökningarna i både Forsmark och Oskarshamn nått uppsatta mål är inte sannolikt.

De regelbundna uppdateringarna av de platsbeskrivande modellerna ger viktiga underlag för att väga den eventuella nyttan med fortsatta undersökningar mot insatserna /4-30/. Om tillförsel av ytterligare data inte ändrar modellerna i någon större utsträckning är det ett tecken på att processen med kunskapsuppbyggnad genom stegvisa undersökningar planat ut. Fortsatta undersökningar är då inte motiverade. Detta ska inte tolkas som att alla möjligheter att förbättra underlaget med hjälp av fortsatta undersökningar från ytan är uttömda. Ett nytt borrhål kan exempelvis täppa till en lokal lucka i dataunderlaget eller reducera osäkerheterna för någon parameter, men inte i en omfattning som motiverar insatsen. I fallet Forsmark står det klart att modellerna nu stabiliserat sig och att de motsvarar en kunskapsnivå som är tillräcklig för de ändamål som angetts ovan. Även i fallet Laxemar bedöms modellerna till stora delar ha stabiliserats när det gäller bergdomäner och större deformationszoner. Kompletterade undersökningar och analys av data betydelsefulla för den slutliga beskrivningen av kvartsmonzodioritens utbredning i söder och dess egenskaper på förvarsdjup pågår fortfarande. Dessa tillkommande data förväntas bidra framför allt till beskrivningen av bergmekaniska förhållanden, fördelningen av grundvattenflöde och den hydrogeokemiska situationen samt placeringen av deponeringsområden.

Valet av plats för slutförvaret är ett beslut som ger betydande bindningar för kärnbränsleprogrammet – tekniskt, politiskt, tidsmässigt och ekonomiskt. Det är således viktigt att minimera risken för ett beslut som senare visar sig vara felaktigt. Mot denna bakgrund – och med vetskap om att beslutet trots allt ska fattas på grundval av undersökningar från ytan – har platsundersökningarna drivits med hög ambitionsnivå när det gäller kraven på att uppnå en tillräckligt god platskänedom. Det faktum att det avgörande beslutet ska fattas innan tillträde finns till bergutrymmen på förvarsdjup innebär ändå ofrånkomliga begränsningar i underlaget och därmed också risker som måste beaktas. Det finns frågor som, för att kunna besvaras, kräver mera detaljerade undersökningar än vad som kan göras från ytan och/eller för direkta erfarenheter från bergbyggnad på platsen. Ett exempel är kunskap om bergmekaniska förhållanden i tunnelskala. Ett annat är acceptanskriterier för deponeringspositioner. Detaljerade undersökningar under jord bedöms komma att ge underlag för kriterier avseende placering av bergutrymmen och deponeringshål som är mer exakta, mindre restriktiva och effektivare än vad som är möjligt utifrån underlaget från platsundersökningarna. För att hantera denna kvarvarande osäkerhet kommer de förvarsutformningar som tas fram som underlag till SR-Site sannolikt att behöva bygga på restriktiva antaganden och därmed vara preliminära. Andra osäkerheter får hanteras på liknande sätt.

Avgörande inför platsvalet är att de grundläggande bedömningarna av platsernas lämplighet är rimligt tillförlitliga och att underlaget ger möjligheter att jämföra platserna. Så är enligt SKB:s uppfattning fallet. Kvar finns risker som kan uttryckas i tid och kostnader. Dessa är kopplade till den ofullständiga kunskapen om bergförhållandena, med åtföljande osäkerheter i resursbehov för att uppföra och driva en anläggning som uppfyller kraven. Detta är osäkerheter som SKB är berett att ansvara för.

4.3.2 Metodik och planering för platsvalet

SKB har i olika sammanhang redovisat generella faktorer som är vägledande för lokaliseringen av slutförvaret /4-29/. Med dessa och kraven i lagstiftningen som utgångspunkt är avsikten att redovisa valet av plats, med stöd av bakomliggande utvärderingar och motiveringar. Redovisningen måste bland annat klargöra hur lagar och regelverk beaktats, liksom SKB:s ställningstaganden och värderingar i relation till andra kriterier.

SKB:s planering syftar till att – efter jämförelser – kunna välja den ena av de två platser som nu undersöks. Först måste emellertid platserna utvärderas var för sig, i syfte att klargöra lämpligheten för en lokalisering. Grundläggande för lämpligheten är att ändamålet med den planerade verksamheten kan uppnås, det vill säga att slutförvara det använda kärnbränslet så att människors hälsa och miljön skyddas. Detta är liktydigt med att ett förvar på platsen måste uppfylla kraven på säkerhet och strålskydd och att de åtgärder som krävs för att åstadkomma ett sådant förvar är genomförbara. Om det visar sig att båda platserna befinner sig i sig är nästa steg en jämförande värdering. Syftet med denna är att kunna prioritera den ena platsen. Värderingen görs ur ett helhetsperspektiv, där en rad faktorer beaktas. Den vägledande principen är att den plats ska väljas där ändamålet med etableringen kan uppnås med minsta intrång och olägenhet.

Vid sidan av alla data om de två lokaliseringalternativen från platsundersökningarna kommer bakgrunds- och jämförelsematerial att spela en viktig roll i utvärderingen av platsernas meriter. Ett omfattande referensmaterial finns att tillgå från det mångåriga utvecklings- och lokaliseringsarbetet /4-29, 4-31/, men även från andra källor. Särskilt värdefull kunskap när det gäller bergförhållanden och säkerhetsaspekter finns från undersökningar av typområden /4-31/, undersökningar inom ramen för det finska lokaliseringsprogrammet /4-32/, mera generella studier av för- och nackdelar med lokaliseringar i olika geologiska miljöer och geografiska lägen /4-31/, samt erfarenheterna från platsanknutna säkerhetsanalyser. Underlag om miljö- och samhällsfaktorer kan till stor del hämtas från utredningar gjorda under lokaliseringsprocessens olika skeden, framför allt förstudierna.

Underlaget för platsvalet ställs samman i samband med att underlaget för ansökan successivt blir klart. Planeringen bygger på att valet görs i ett skede där båda lokaliseringalternativen har utvecklats så långt att de kan utvärderas i alla relevanta avseenden – var för sig och i relation till varandra. De analysresultat och redovisningar som krävs bedöms bli tillgängliga i preliminär form i god tid innan ansökan lämnas in. Andra scenarier är dock tänkbara beroende på utfallet av återstående utvärderingar av lokaliseringalternativen.

Valet av plats ska motiveras i SKB:s ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken. SKB:s motiveringar och argument kommer att granskas och prövas av expertmyndigheterna, miljödomstolen och andra parter inom ramen för tillståndsprövningarna. Stora krav ställs därmed på att underlag och argument för det val som görs redovisas tydligt i ansökningarna. Kraven enligt lokaliseringsprincipen i miljöbalken (2 kap 6 §) anger ramarna.

Platsvis utvärdering

Platserna utvärderas alltså först var för sig, i förhållande till kraven i kärntekniklagen, strålskyddslagen och miljöbalken samt SKB:s egna krav och önskemål. Syftet är att avgöra om respektive plats är lämplig i sig, med avseende på alla relevanta krav.

För att vara lämplig måste platsen, förutom att uppfylla de grundläggande säkerhets- och strålskyddskraven, även medge att etableringen och verksamheten kan genomföras med rimlig hänsyn till miljön i övrigt och till rimliga insatser. Bestämmelser avseende exempelvis hushållning med mark och vatten måste kunna uppfyllas. Därutöver krävs avvägningar, där nyttan med etableringen värderas mot de intrång och olägenheter som den trots allt medför. På liknande sätt gäller att nyttan av åtgärder som kan vidtas för att undvika eller reducera olägenheter ska vägas mot de insatser som krävs. Grunden är att skyddet för människa och miljö ska kunna tillgodoses.

För att en plats ska kunna väljas måste den också vara tillgänglig, både rent fysiskt och ur ett samhällsperspektiv. Den fysiska tillgängligheten innebär bland annat att SKB måste kunna få rådighet över erforderlig mark och att inte gällande miljöskydds- eller planförhållanden avsevärt försvårar en etablering. Inför platsundersökningarna konstaterade SKB att inga uppenbara hinder i dessa avseenden kunde förutses för någon av platserna. Samma bedömning görs i dag.

Tillgänglighet ur ett samhällsperspektiv innebär att platsvalet måste ha politiskt stöd. I praktiken innebär detta att den berörda kommunen liksom regeringen accepterar lokaliseringen. På denna centrala punkt kan av uppenbara skäl inget avgörande förväntas förrän ärendet tillåtlighetsprövas av regeringen, varvid även kommunen har att ta ställning. Så vitt SKB kan bedöma är inställningen till en eventuell etablering av slutförvaret i dagsläget stabilt positiv i både Östhammars och Oskarshamns kommun.

Jämförande värdering

Förutsatt att båda platserna finns tillgängliga och lämpliga i sig för slutförvaret görs en jämförande värdering. Även denna måste göras ur ett helhetsperspektiv. I huvudsak görs den jämförande värderingen utifrån samma underlag och för samma faktorer som den grundläggande bedömningen av platsernas lämplighet. Exempel på enskilda faktorer som behöver beaktas är säkerhet och strålskydd, etableringens påverkan på natur-, kultur- och boendemiljö, transportbehov, energihushållning och andra resursfrågor samt tekniska aspekter som effektivitet och tillförlitlighet vid bygge och drift. Avsikten är att den jämförande utvärderingen ska utmynna i tydliga ställningstaganden från SKB:s sida i viktiga värderingsfrågor och slutligen i ett väl motiverat val av den ena av de två undersökta platserna.

Förutsatt att platsvalet kan slutföras på det sätt som skisserats ovan blir den valda platsen slutresultatet av en omfattande och stegvis genomförd lokaliseringsprocess. Processen har inneburit en mångårig kunskapsuppbyggnad om faktorer och förhållanden som är viktiga för lokaliseringen av slutförvaret, geovetenskapliga och andra studier i nationell och regional skala, samt utvärderingar och jämförelser av kandidatplatser som kommit fram under förstudie- och platsundersöknings-skedena. Med stöd av detta anser SKB att den slutligen valda lokaliseringen kan motiveras i förhållande till varje annan plats som kan anses lämplig i meningen potentiellt möjligt lokaliseringsalternativ. Detta gäller både platser som i tidigare skeden av lokaliseringsprocessen funnits med i urvalsunderlaget och eventuella andra platser.

5 Utgångspunkter för uppförande och drift

I samband med platsvalet för slutförvaret avser SKB att initiera ett projekt med uppgift att uppföra och driftsätta slutförvaret. Planeringen för detta projekt pågår. De kapitel som följer ska betraktas som en lägesredovisning av planeringsarbetet. En mera fullständig redovisning kommer att ingå i underlaget för ansökan.

Viktiga utgångspunkter för projektet är:

- SKB:s övergripande handlingsplan (redovisas i del I).
- Platsbeskrivningen för den plats som väljs (SDM-Site).
- Den platsanpassade anläggningsutformningen (Layout D2).
- Säkerhetsanalysen SR-Site.
- Resultat från teknikutveckling.
- Branschkunskap om byggande av undermarksanläggningar.

5.1 Huvudskeden och tidsplan

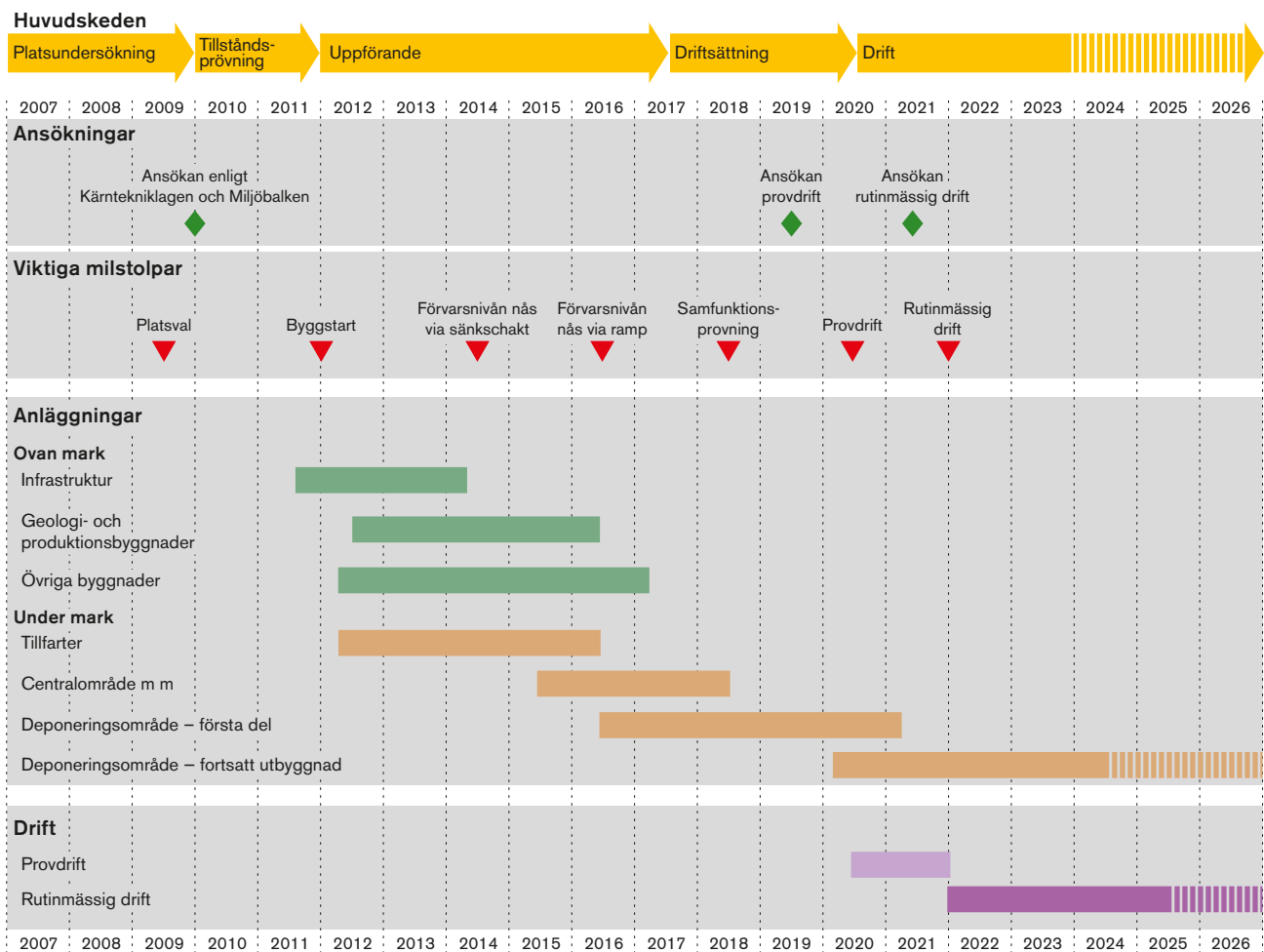
Figur 5-1 visar den uppdelning i huvudskeden som ligger till grund för SKB:s planering för att uppföra, driftsätta och driva slutförvaret, samt motsvarande milstolpar och huvudaktiviteter. Den tidsplan som återges i figuren är behäftad med osäkerheter. Under tillståndsprövningen, det vill säga tidsperioden mellan det att en ansökan lämnats in och till dess att tillstånd meddelats, har SKB begränsade möjligheter att påverka tidsåtgången. Vi uppskattar att processen tar minst två år.

Hur lång tid som sedan behövs för att uppföra och driftsätta de delar av anläggningen som behövs för att kunna inleda provdrift kan bedömas med större säkerhet, men även här finns osäkerheter. Det gäller bland annat kvarstående osäkerheter om bergförhållandena på platsen, vilka ytterligare utredningar som måste göras med anledning av SR-Site samt teknikutvecklingen för de olika delsystemen. Även krav från myndigheterna kan tillkomma i samband med att villkoren för uppförande och drift fastställs. Slutligen måste driftsättningen av slutförvaret koordineras med motsvarande skede för övriga anläggningar i systemet. Sammantaget uppskattas tidsåtgången från byggstart till ansökan om provdrift till cirka sju år.

Provdriften syftar i första hand till att få erfarenhet av att driva anläggningarna och att med dessa erfarenheter som grund komplettera säkerhetsredovisning samt rutiner och instruktioner för den rutinmässiga driften. När provdriften kan övergå i rutinmässig drift är beroende av när SKB kan visa att driften rutinmässigt kan genomföras på planerat sätt och med önskad kapacitet, samt av myndighetsbeslut. Detta – och det faktum att skedet ligger långt fram i tiden – gör tidpunkten osäker. Bedömningen är att rutinmässig drift ska kunna inledas efter högst två års provdrift. Hur länge den rutinmässiga driften pågår indikeras inte i figur 5-1, men bedöms med nuvarande planeringsförut-sättningar till cirka 50 år /5-1/.

5.1.1 Tillståndsprövning

Huvudskedet tillståndsprövning startar när ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken har lämnats in. Då ska ansökningarna beredas och prövas av myndigheter, miljödomstol, kommun och regering. Under denna period ligger initiativet i projektet till stor del hos dessa instanser och tidsåtgången beror på deras handläggnings- och beslutstider. SKB:s huvuduppgifter är att på olika sätt medverka i tillståndsprövningen, samt att förbereda arbetet med att uppföra slutförvaret. Ansvaret för detta ligger på den projektorganisation för uppförande och driftsättning som etablerats i samband med platsvalet. I förberedelserna ingår fortsatt teknikutveckling och projektering samt att förbereda upphandling av leverantörer.



Figur 5-1. Översiktlig tidsplan för slutförvaret.

5.1.2 Uppförande

När alla tillstånd och villkor är klara ska slutförvaret uppföras – både anläggningar under mark och anläggningar ovan mark. Under mark byggs först tillfarter till förvarsnivån. När bergdriften kan etableras på förvarsnivån byggs transporttunnlar, centralområdet och de första tunnarna med deponeringspositioner. Parallellt och integrerat med anläggningsarbetena görs undersökningar som underlag för att detaljprojektera anläggningen mot aktuella krav och restriktioner. Dessa undersökningar ska också verifiera de antaganden som legat till grund för säkerhetsanalysen SR-Site. Ovan mark uppförs de byggnader och den infrastruktur som behövs för att driva anläggningen.

5.1.3 Driftsättning

Driftsättningen av slutförvarets delsystem startar successivt i takt med att systemen kommer på plats. Systemen testas, först var för sig, sedan gemensamt inom anläggningen och slutligen hela slutförvarssystemet, alltså även inkapsling och transporter. Målet är att hela systemet ska fungera i industriell skala, tekniskt och organisatoriskt. Intrineringen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning av hela anläggningen. Så tidigt som möjligt under driftsättningen förnyar SKB säkerhetsredovisningen (avseende såväl långsiktig säkerhet som drift) och lämnar in ansökan om provdrift. Driftsättningen avslutas då myndigheterna ger tillstånd för provdrift. Därmed övergår ansvaret för anläggningen från organisationen för uppförandeskedet till driftorganisationen.

5.1.4 Drift

Driftskedet inleds med en period av provdrift. Då startar deponeringen av kapslar med använt kärnbränsle och deponeringskapaciteten byggs upp stegvis. Provdriften övergår sedan i rutinmässig drift. Förutom deponeringssekvensen innefattar driften även löpande undersökningar och analyser, projektering, bergarbeten samt återkommande säkerhetsanalyser. Driften av slutförvaret innebär alltså ett kontinuerligt projekterande, byggande och deponerande. Driften pågår fram till dess att den sista deponeringstunneln förslutits.

5.2 Beslutspunkter och milstolpar

Slutförvarets livscykel innehåller ett antal milstolpar. Figur 5-1 indikerar några av dessa. Övergripande kan milstolparna delas in i SKB:s egna beslut och etappmål respektive myndighetsbeslut.

5.2.1 SKB:s egna beslut och etappmål

Det går inte att i detalj förutsäga SKB:s beslut och etappmål för slutförvaret under uppförande och drift. Med början efter inlämnade ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken kan dock följande viktiga milstolpar urskiljas:

- Kontraktera entreprenör för de inledande byggarbetena.
- Etablera och starta byggverksamheten
- Påbörja byggandet av berganläggningar på försvarsnivå.
- Påbörja byggandet av det första deponeringsområdet.
- Påbörja samfunktionsprovning av hela systemet.
- Ansöka om tillstånd för provdrift.
- Påbörja provdrift.
- Ansöka om tillstånd för rutinmässig drift.
- Påbörja rutinmässig drift.

5.2.2 Myndighetsbeslut

Följande viktiga myndighetsbeslut kan förutses:

- Kommunfullmäktiges beslut om att tillstyrka verksamheten.
- Regeringens beslut om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen.
- Kommunens beslut om att anta detaljplan.
- Kommunens beslut om bygglov.
- SKI:s beslut om villkor enligt kärntekniklagen.
- SSI:s beslut om villkor enligt strålskyddslagen.
- Miljödomstolens beslut om tillstånd och villkor, bland annat enligt kapitel 9 och kapitel 11 i miljöbalken.
- SKI:s beslut om tillstånd för provdrift.
- SKI:s beslut om tillstånd för rutinmässig drift.

Till dessa kan det komma ytterligare beslut och avstämningar, bland annat enligt de villkor som fastställs när tillståndet för slutförvarssystemet beviljas och i samband med återkommande uppdateringar av säkerhetsredovisningarna.

5.3 Teknikbehov

En given förutsättning för att slutförvaret ska kunna uppföras och drivas är att den teknik som behövs i olika skeden finns utvecklad och färdig att tas i industriellt bruk i den takt behoven uppstår. Kapitel 6 redovisar nuläget för den arbetsmetodik som utarbetas för projektering och teknikimplementering under uppförande och drift. SKB:s program för teknikutveckling redovisas i del III. Där framgår också vilka utvecklingsbehov som finns för olika delsystem. Nedan redovisas en sammanfattning av planerad status för teknikutveckling inför ansökan. Motsvarande sammanfattning av planerad status för huvudskedena tillståndsprövning, uppförande och driftsättning redovisas i kapitel 7, 8, respektive 9.

Inför ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret redovisas en referensutformning som ger en samlad bild av gjorda och återstående teknikval samt hur långt utvecklingen av olika delsystem nått vid det tillfället. Eftersom det då fortfarande återstår några år fram till byggstart behöver ingen teknik i direkt mening vara ”färdig” att tas i industriellt bruk. Grundkravet är i stället att tekniska lösningar ska kunna redovisas på ett sådant sätt att det framgår huruvida de:

- uppfyller angivna krav och konstruktionsförutsättningar för slutförvaret,
- är genomförbara.

En konsekvens av detta är att de lösningar som redovisas måste vara så långt komna utvecklingsmässigt att de rimligen kan fullbordas i tid inför tillämpningen vid uppförande eller drift.

Tabellerna 5-1 till och med 5-4 sammanfattar den planerade statusen inför ansökan för teknikkomponenter med mera som ska användas vid bygge och drift. Formatet för tabellerna ansluter till del III. Där inordnas den teknik som behövs för att åstadkomma slutförvarets huvudsakliga delsystem i följande produktionslinjer:

- Berglinjen
- Buffertlinjen
- Bränslelinjen
- Kapsellinjen
- Återfyllningslinjen
- Förslutningslinjen

Produktionslinjerna kan sägas beskriva produktionen av respektive delsystem enligt principen ”från ax till limpa”. Exempelvis beskriver buffertlinjen hela kedjan från brytning av bentonit, via transporter och diverse behandlingssteg, till appliceringen av färdiga buffertblock i slutförvarets deponeringshåll. Utvecklingsbehovet för den teknik som krävs i olika steg av produktionslinjerna varierar inom vida gränser. För buffertlinjen gäller exempelvis att brytning och transporter av bentonit är känd och beprövad teknik, som kan tillämpas direkt för slutförvarets behov. Däremot är tillverkningen av block med rätt kvalitet en unik verksamhet som krävt – och fortfarande kräver – ett omfattande utvecklingsarbete innan den kan implementeras.

Vänsterkolumnerna i tabellerna 5-1 till och med 5-4 motsvarar i förenklad form de delar av produktionslinjerna (exklusive bränslelinjen och förslutningslinjen) som berör slutförvaret. Högerkolumner ger hänvisningar till de avsnitt i del III där utvecklingen av respektive delsystem behandlas.

Tabell 5-1. Teknik för bergarbeten – planerad status inför ansökan.

Teknik	Planerad status/etappmål inför ansökan	Hänvisning till avsnitt i del III
Undersökningar		
Målet för SKB:s insatser inom området är att anpassa och utveckla metoder och instrument så att de uppfyller de krav på säkerhet, snabbhet och effektivitet som kommer att gälla för undersökningar under uppförande och drift.		
Undersökningar i borrhål	Anpassning och utveckling av instrument och metoder inom bland annat geofysik, hydrogeologi, termiska egenskaper och transport-egenskaper pågår. För vissa utrustningar ställs särskilda krav med hänsyn till höga vattentryck och vattenflöden.	12.3
Undersökningar i tunnlar och deponeringshål	Utveckling av ett effektivt system för bergkartering etc pågår i samarbete med Posiva.	12.3.2
	Olika metoder för att mäta vattenflöden i ramp och tunnlar har inventerats och utvärderats.	12.3.7
	Utvecklingen av metodik och metoder för mätning av inflöde till deponeringstunnlar och deponeringshål pågår.	12.3.8
Informationssystem och informationsteknik	Program för att utveckla, förbättra och anpassa SKB:s informationssystem (databaser, visualiseringsprogram etc) har fastställts. System som behövs vid byggstart är prioriterade.	12.3.11
Berguttag		
Målet för SKB:s insatser inom området är att visa att de uttagsmetoder för olika delar av anläggningen som redovisas i referensutformningen uppfyller säkerhetsanalysens krav. Det innebär bland annat att tekniskt kritiska delmoment har testats i realistisk miljö och att uttagsmetoden för deponeringstunnlar demonstrerats vid Äspölaboratoriet.		
Teknik för borrhning och sprängning	Teknik för att styra sprängborrhålen med tillräcklig precision utprovad.	11.1, 12.5
	Säker och ändamålsenlig användning av emulsionssprängämne och elektroniska sprängkapslar utprovad.	11.1, 12.5
Störd zon	Karakterisering av zoner med olika grad av sprängstörning har utförts. Försöken har omfattat sambanden mellan mekanisk skada och hydrauliska egenskaper.	12.5
	Metoder (försiktig sprängning, linsågning) för begränsning av skadezon i tunnelbotten är utvärderade och jämförda.	12.5
Borrhning av deponeringshål	Referensmetod för borrhning vald.	11.1, 12.7
	Preliminär konstruktion av prototyp till maskin för borrhning av deponeringshål klar.	11.1, 12.7
Bergförstärkning		
Målet för SKB:s insatser inom området är att anpassa etablerade metoder för bergförstärkning genom att ta fram recept på bruk för bergbultar och sprutbetong som uppfyller kraven på lågt pH.		
Material till bergförstärkning	Referensmaterial för sprutbetong, nätning och bergbultar som uppfyller kraven på lågt pH valt och utprovat.	11.1, 12.6
Sprutbetong	Utprovning av utrustning för bruk med lågt pH pågår.	12.6
Tätningsteknik		
Målet för SKB:s insatser inom området är att tillhandahålla teknik för att kunna hantera alla förväntade tättningsbehov, samtidigt som de särskilda krav som gäller för slutförvaret beaktas.		
Teknik och material för tätning av vattenförande sprickor och zoner	Silica sols användbarhet för tätning av vattenförande strukturer på förvarsdjup bekräftad genom fältförsök.	11.1, 12.4
	Referensmaterial för låg-pH-bruk valt och testat.	11.1, 12.4
Teknik och material för tätning av stora zoner med stark vattenföring	Strategi för tätning framtagen.	11.1, 12.4

Tabell 5-2. Teknik för buffert – planerad status inför ansökan.

Teknik	Planerad status/etappmål inför ansökan	Hänvisning till avsnitt i del III
Produktion och hantering ovan mark		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Preliminär projektering pågår. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Preliminär projektering pågår. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Pressning – block och ringar	Referensmetod vald med stöd av väl underbyggda argument. Blockegenskaper av betydelse kända.	11.2, 13.3.1
Produktion – pelletter och granuler	Produktionssätt valt för respektive bentonitkvalitet.	13.3.2
Mellanlagring – block och pelletter	Krav och förutsättningar klarlagda, referensmetoder valda.	11.2, 13.4
Hantering och applicering – deponeringshål		
Inredning	Material för referensutformning valda. Utformning och byggnation testade, buffertskydd testat i full skala.	11.2, 13.5
Installation – block och ringar	Referensmetod redovisad. Utprovning av installationsmetod pågår.	11.2, 13.6
Installation – pelletter/granuler	Metod under utveckling för aktuella material. Referensmetod vald.	13.7

Tabell 5-3. Teknik för kapselhantering och deponering vid slutförvaret – planerad status inför ansökan.

Teknik	Planerad status/etappmål inför ansökan	Hänvisning till avsnitt i del III
Målet för SKB:s insatser inom området är att preliminär konstruktion av transportfordon och annan utrustning ska finnas framtagen. Den deponeringsmaskin som finns i Äspölaboratoriet ska också vara ombyggd, så att den går på hjul i stället för på räls.		
Hantering av transportbehållare ovan mark och nedtransport i ramp	Preliminär konstruktion av hanteringsutrustning för terminalbyggnad klar.	–
	Preliminär konstruktion av vald fordonstyp för transport i ramp klar.	11.3, 14.8
	Risakanalys för ramptransport genomförd.	14.8
Omlastningsstation och utrustning för att flytta kapslar från transportbehållare till deponeringsmaskin	Preliminär konstruktion av utrustning för omlastningsstation klar.	14.8
	Utprovning av teknik för överföring av kapsel från behållare till deponeringsmaskin samt övrig hantering pågår (Äspölaboratoriet).	14.8
Deponeringsmaskin och övrig utrustning för att installera buffert och deponera kapslar	Befintlig spårbunden maskin ombyggd till hjulburen och utrustad med navigerings- och positioneringssystem för fjärrstyrning. Den ombyggda maskinen provad i olika normala och onormala situationer.	11.3, 14.8
	Konstruktion och test av utrustning för inplacering av buffertblock och buffertringar med tillhörande arbetsmoment pågår; utförs delvis i samarbete med Posiva.	11.2, 13.6

Tabell 5-4. Teknik för återfyllning och förslutning – planerad status inför ansökan.

Teknik	Planerad status/etappmål inför ansökan	Hänvisning till avsnitt i del III
<i>Produktion och hantering ovan mark</i>		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Preliminär projektering pågår. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Preliminär projektering pågår. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Pressning – block till övre del av deponeringshål	Referensmetod vald med stöd av väl underbyggda argument. Blockegenskaper av betydelse kända.	15.3
Pressning – block för deponeringstunnel	Känd och kommersiellt tillgänglig teknik, provtillverkning av block av aktuell storlek genomförd.	15.3
Mellanlagring – block, pelletar/ granuler	Krav och förutsättningar klarlagda, referensmetoder valda.	13.4, 15.4
<i>Hantering och applicering – deponeringstunnel</i>		
Borttag av dränage och tillfälligt buffertskydd	Provad i full skala.	15.5
Återfyllning – övre del av deponeringshål	Referensmetod vald och verifierad vid Bentonitlaboratoriet och Äspölaboratoriet.	15.6
Återfyllning – block i tunnel	Referensmetod redovisad. Prototyputrustning för hantering och inläggning byggd och testad.	11.4, 15.6
Återfyllning – pelletar/granulat i tunnel	Referensmetod redovisad. Prototyputrustning för hantering och applicering byggd och testad.	11.4, 15.7
Förslutning – temporär plugg i tunnel	Olika koncept utvärderade. Referensalternativ valt.	11.4, 15.8

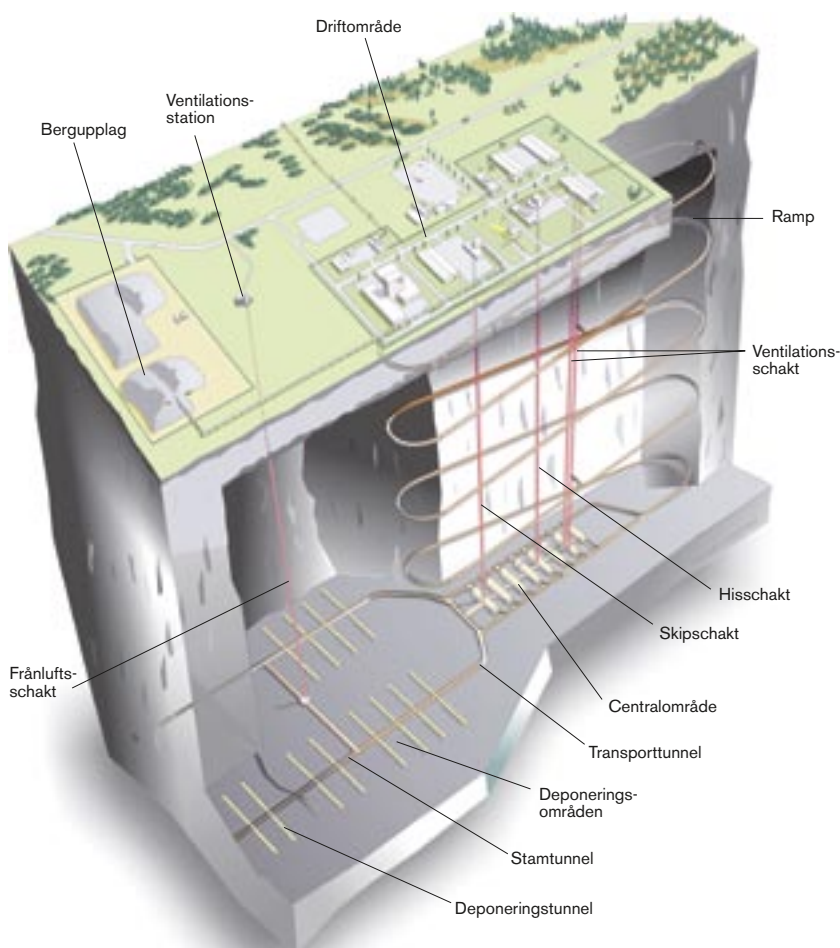
6 Arbetsmetodik under uppförande och drift

Slutförvaret består av ett antal anläggningsdelar. För varje anläggningsdel kommer SKB att tillämpa den arbets- och projekteringsmetodik som är bäst lämpad med hänsyn till anläggningens typ och funktion. För de bergförlagda delarna krävs en annan metodik än för de markförlagda. I pågående planering inför uppförande och drift ingår att ta fram lämplig metodik för att projektera och bygga förvarets alla delar. Detta kapitel ger en lägesredovisning av det arbetet, och utgör också en preliminär programförklaring för hur uppförande och drift av förvaret kommer att ske.

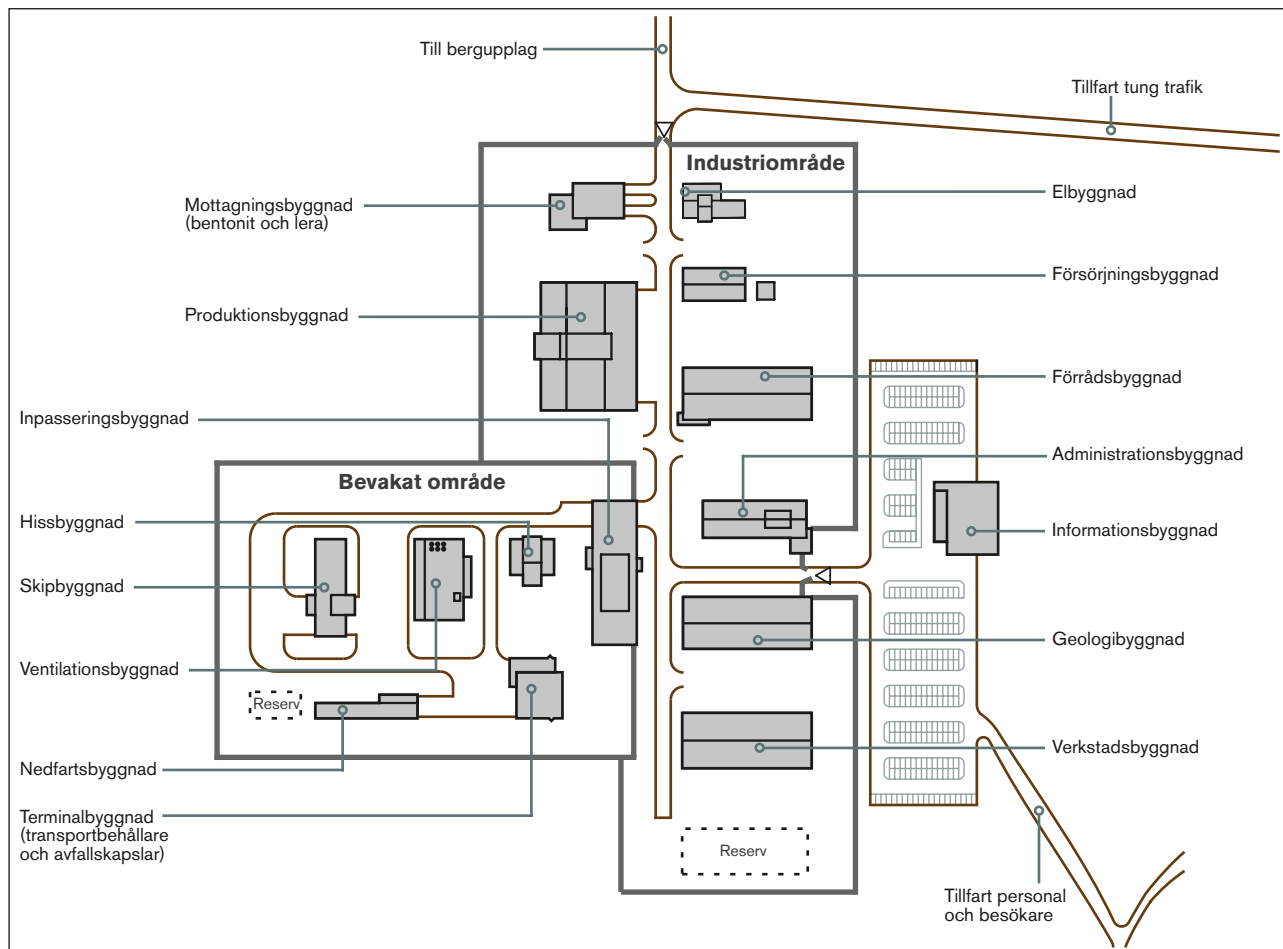
I avsnitt 6.6 beskrivs kortfattat nuläge och utgångspunkter för kvalitetsstyrning och i avsnitt 6.7 redovisas en översikt av pågående och planerat arbete med safeguard för slutförvaret.

6.1 Anläggningsdelar

På en övergripande nivå kan slutförvaret delas in i utrymmen under mark, byggnader och anläggningar ovan mark samt tekniska installationer, se figur 6-1 och figur 6-2. De olika delarna kommer att byggas ut stegvis.



Figur 6-1. Slutförvarets olika delar.



Figur 6-2. Byggnader och anläggningar ovan mark.

Utrymmena under mark kan delas in i följande anläggningsdelar:

- Ramp (nedfartstunnel)
- Skipschakt (schakt för uppföring av utsprängt berg)
- Övriga schakt (persontransporter, ventilation)
- Centralområde
- Transporttunnlar
- Deponeringsområden (stamtunnlar, deponeringstunnlar).

Byggnader och anläggningar ovan mark framgår av figur 6-2. Utanför själva driftområdet enligt figur 6-2 finns bland annat tillfartsvägar och annan infrastruktur, område för bergupplag samt överbyggnader för ventilationsschakt.

Tekniska installationer omfattar:

- Ventilation
- Vatten och avlopp, dränage
- Hissar, inklusive bergtransportsystem
- Elkraft
- Brandskydd
- Kommunikation, kontroll och driftövervakning.

6.2 Viktiga begrepp

Säkerhetsredovisning

Innan en kärnteknisk anläggning får uppföras ska en preliminär säkerhetsredovisning sammanställas. Provdriften av anläggningen får inte påbörjas förrän säkerhetsredovisningen har förnyats. Anläggningen får därefter tas i rutinmässig drift först sedan säkerhetsrapport kompletterats. Säkerhetsredovisningen ska sedan förnyas regelbundet, normalt vart tionde år /6-1, 6-2/.

Säkerhetsredovisningen för slutförvaret ska omfatta såväl säkerheten under drift som den långsiktiga säkerheten efter förslutning /6-1/. Till ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret kommer SKB således att ta fram en preliminär säkerhetsredovisning för driften, som visar hur anläggningen uppfyller kraven på kärnteknisk säkerhet (PSAR), samt en preliminär säkerhetsredovisning för den långsiktiga säkerheten (SR-Site).

Under utbyggnaden av förvaret kommer SKB att uppdatera och detaljera platsbeskrivningen och bedöma om förutsättningarna ligger inom de ramar som angivits i SR-Site. En förnyad säkerhetsredovisning tas fram inför ansökan om provdrift, samt om det i något skede visar sig att förutsättningarna i SR-Site eller PSAR inte är uppfyllda.

Platsbeskrivning

Platsbeskrivningen med tillhörande platsmodell utgör en beskrivning av en plats och dess regionala omgivning. Platsbeskrivningen omfattar nuvarande tillstånd och egenskaper hos geosfären och biosfären samt en beskrivning av de pågående naturliga processer som kan förväntas påverka platsens utveckling över längre tid. Platsbeskrivningen ger underlag för att klarlägga vilka nya data som behöver samlas in. Den används vid projekteringen för att placera och utforma slutförvaret och som underlag för att analysera förvarets långsiktiga säkerhet. Ett antal platsbeskrivningar med tillhörande stödjande modeller har tagits fram under platsundersökningarna. De platsbeskrivningar som tas fram när platsundersökningarna är avslutade, SDM-Site, kommer att utgöra underlag för SR-Site.

Referensutformning

I den stegvisa utformningen av KBS-3-systemet använder SKB begreppet referensutformning. En referensutformning är giltig från en definierad tidpunkt till dess att något annat beslutas. Den fastställda referensutformningen ska användas som förutsättning för teknikutveckling, projektering och analyser av säkerhet, strålskydd och miljöpåverkan. Referensutformningen beslutas inom ramen för SKB:s kravhantering. Den ska vara tillräckligt detaljerad för att teknikutveckling, projektering och analyser av säkerhet, strålskydd och miljöpåverkan ska kunna genomföras. Samtidigt ska den lämna utrymme för förbättringar och platsanpassning.

Dimensionering

Allmänt begrepp för att bestämma erforderlig storlek, dimension, bärförmåga etc för en konstruktion, i syfte att uppfylla specificerade krav. I standarden EN-1997-1, Eurocode 7 /6-3/, fastställd 10 augusti 2007, anges vilka metoder som bör användas vid dimensionering av berganläggningar. Standarden klargör också vilka moment som bör ingå i projekteringen. De viktigaste momenten är:

- Insamling, redovisning och tolkning av geotekniska data.
- Dimensionering av bärverket (bland annat berganläggningar).
- Kontroll av utförandet, övervakning av konstruktionens beteende samt underhållsplan.

Kontrollprogram

I kontrollprogrammet redovisas vilka mätningar och observationer som ska utföras för att bedöma om konstruktionen uppför sig som förväntat eller om åtgärder beskrivna i åtgärdsplanen ska sättas in. Dessa åtgärder ska vara fastlagda innan byggandet startar.

Anläggningsdokumentation

Förutom färdigställda utrymmen under mark resulterar projekteringen och bygget i en omfattande anläggningsdokumentation. Denna består av aktuella ritningar över anläggningen, dess byggnadsstrukturer, system, komponenter och anordningar, samt de handlingar som visar hur dessa har tillverkats, installerats och kontrollerats. I förekommande fall bör även uppgifter om vilka ändringar som har gjorts i anläggningen ingå i dokumentationen /6-2/.

6.3 Metodik för projektering och bygge av utrymmen under mark

Projekteringen och bygget av slutförvaret ska genomföras så att:

- Förvarets bergutrymmen – särskilt deponeringstunnlar och deponeringshål – förläggs och utformas med hänsyn till de krav och restriktioner som gäller med avseende på förvarets långsiktiga säkerhet.
- Förvaret utformas och byggs så att det uppfyller de krav och restriktioner som gäller med avseende på driftsäkerhet, arbetsmiljö och strålskydd.
- Bergkonstruktionen uppfyller ställda krav avseende stabilitet, inläckage, geometri med mera.

För att klara detta behövs en väl genomtänkt och för slutförvarets berganläggningar anpassad arbetsmetodik.

6.3.1 Hittills tillämpad projekteringsmetodik

I Fud-program 2004 redovisade SKB den projekteringsmetodik med en stegvis, allt mer detaljerad projektering som tillämpats före och under platsundersökningsskedet. Tabell 6-1 ger en översikt och sammanfattning av projekteringsstegens omfattning och vilka produkter som tas fram under de olika stegen. För närvarande pågår arbetet med layout D2, som kommer att utgöra underlag för SR-Site och ansökan för slutförvaret.

Projekteringen under platsundersökningsskedet enligt tabell 6-1 kan beskrivas som att den planerade anläggningen placerats i och anpassats till en modell av platsen. I varje steg har alla delar av den tänkta anläggningen så långt möjligt bearbetats till jämförbar detaljeringsnivå.

Tabell 6-1. SKB:s projekteringsmetodik före och under platsundersökningsskedet – projekteringssteg, omfattning och produkter (bearbetad efter /6-4/).

Projekteringssteg	Omfattning	Produkter
Layout E	Samlad ej platsanpassad projektering.	Anläggningsbeskrivning baserad på teoretiska layouter för ovan- och undermarksdelen /6-5, 6-6, 6-7/.
Layout D0	Platsanpassad projektering av ovanmarksdelen.	Sammanställning av möjliga lägen och layouter för ovanmarksdelen.
Layout D1	Platsanpassad projektering av undermarksdelen baserad på data från den inledande delen av platsundersökningen.	Layout för valda alternativ för ovan- och undermarksdelen /6-8, 6-9, 6-10/. Anläggningsbeskrivningar baserade på alternativa layouter /6-11, 6-12, 6-13/. Underlag för preliminär säkerhetsbedömning och SR-Can /6-8, 6-10/.
Layout D2	Fortsatt platsanpassad projektering av anläggningen baserad på fullständiga data från platsundersökningen, säkerhetsanalysen SR-Can /6-14/ och miljöutredningar.	Layout för föreslagen anläggning med situationsplan för ovanmarksdelen och placering av tillfarter. Anläggningsbeskrivning baserad på föreslagen layout. Underlag för SR-Site och MKB. Underlag för ansökan om slutförvaret. Underlag för upprättande av förfrågningshandlingar för i första hand tillfarter till förvaret.

6.3.2 Utgångspunkter för arbetsmetodik under uppförande och drift

Under uppförande och drift ska den faktiska anläggningen uppföras på den verkliga platsen. Denna övergång från en tänkt anläggning i en modell till en fysisk anläggning på plats får konsekvenser för hur verksamheten kan och bör genomföras. Olika delar av anläggningen kommer att befinna sig i olika faser av planering och produktion. När vissa delar är färdiga pågår bergarbeten för andra, för åter andra görs undersökningar och detaljprojektering, medan några endast är preliminärt projekterade. För denna verklighet behövs en annan metodik än den som hittills har tillämpats.

Ett annat förhållande som i hög grad ställer krav på valet av metodik för att projektera och bygga slutförvaret är att bergets faktiska egenskaper och beteende kommer att vara fullständigt kända först när bergguttaget genomförts. Bergförhållandenas (geologi, hydrogeologi, grundvattenkemi etc) inflytande på placering av deponeringstunnlar och deponeringshål samt deras inflytande på konstruktionens utformning och dimensionering medför betydande osäkerheter. De undersökningar som föregår bergguttaget kan minska dessa osäkerheter. Det är ändå nödvändigt att fortlöpande ta tillvara den kunskap om berget – och dess reaktion på bergguttaget – som vinnns först när bergguttaget sker. Projektering och bygge av förvarets bergutrymmen måste därför med nödvändighet bedrivas som en iterativ process.

Metodiken för att projektera och uppföra anläggningar under mark måste således vara anpassad till det faktum:

- att förvarets olika delar kommer att befinna sig i olika skeden av utbyggnaden,
- att bergbyggande är förknippat med osäkerheter,
- att den slutliga utformningen, inklusive kapselpositioner, kan fastställas först sedan bergguttaget i deponeringstunnlar är klart och erforderliga undersökningar utförts.

Andra viktiga utgångspunkter är:

- De krav och restriktioner från lagar, föreskrifter, ägare och andra intressenter som ligger till grund för projekteringen (platsanpassning, utformning och konstruktion) måste hanteras på ett systematiskt och spårbart sätt.
- Platsbeskrivningen och de underliggande modellerna måste tolkas så att de kan användas som underlag vid projektering och byggande av anläggningen. Detta arbete har påbörjats och en första ingenjörsgelogisk beskrivning har tagits fram som underlag för det pågående projekteringsarbetet i layoutsteg D2.
- Anläggningen måste utformas så att slutförvaret med sina tekniska barriärer kan uppföras och övriga verksamheter genomföras på ett säkert, effektivt och miljöanpassat sätt.
- Data och erfarenheter från bergarbetena måste snabbt och effektivt kunna återkopplas till projekteringen. Detta kräver en effektiv samverkan och interaktion mellan undersökningar, modellering, projektering och säkerhetsanalys.

6.3.3 Metoder för dimensionering av berganläggningar

Utifrån nämnda utgångspunkter avser SKB att för varje anläggningsdel använda den dimensioneringsmetod som på ett säkert och ekonomiskt sätt bäst hanterar förekommande osäkerheter, samtidigt som människors hälsa, miljön, anläggningar och maskiner skyddas. Valet av metod beror på typ av projekteringsfråga och vilken funktion berganläggningen har (exempelvis deponeringstunnel eller centralområde). Enligt /6-3/ kan dimensionering av berganläggningar utföras med någon eller en kombination av följande metoder:

- beräkningar baserade på partialkoefficientmetoden eller sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder,
- hävdvunna metoder baserade på jämförbara konstruktioner och beprövad erfarenhet,
- modellförsök och provbelastning,
- observationsmetoden.

Dimensionering genom beräkningar är vanligt vid projektering av berganläggningar. Då fastläggs i princip den slutliga utformningen av konstruktionen i förväg. Konstruktionen byggs i enlighet

med den på förhand utförda projekteringen. Metoden kan tillämpas för konstruktioner (till exempel ett bergblock som fixeras på plats med hjälp av bergbult) där det är möjligt att noggrant bestämma bärförmåga (vad bergbulten klarar av att bära) och last (tyngden av det enskilda bergblocket).

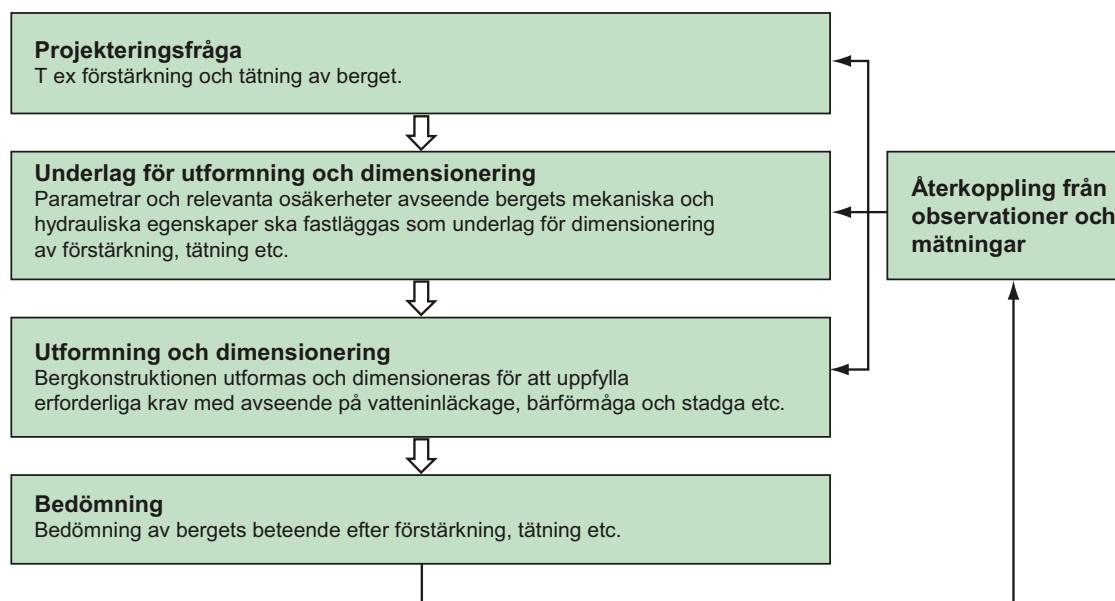
Dimensionering med hävdvunna metoder kan också vara tillämpligt för vissa av slutförvarets projekteringsfrågor, särskilt i tidiga skeden. Till denna metod kan användning av erfarenhetsbaserade system hänföras, exempelvis Q-systemet /6-15/.

Modellförsök och provbelastning är inte aktuella för dimensionering av slutförvarets berganläggningar.

Observationsmetoden kan vara lämplig att använda när det är svårt att förutsäga konstruktionens egenskaper och reaktioner på aktuella laster. Grunderna i metoden är i princip desamma som i den metodik som i Sverige ofta benämns ”aktiv design” och som innehåller de tre grundläggande begreppen förutsägelse, observation och åtgärd. Inom ramen för observationsmetoden omfattas förutsägelse av preliminär projektering och redovisas i form av dimensioneringsrapporter, ritningar och tekniska specifikationer. Eftersom det finns osäkerheter i den projekterade konstruktionen är det ett krav i observationsmetoden att åtgärder, som kan behöva användas i utförandeskedet när konstruktionens beteende avviker från det förväntade, tas fram i förväg och utgör en del av bygghandlingarna. Projekteringskraven ska kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av relevanta observationer. Detta innebär att genomföra observationer, dokumentera och analysera mätdata samt att kommunicera signifikanta händelser så att kompletterande åtgärder kan utföras vid behov. Principen för och arbetsgången vid tillämpning av observationsmetoden illustreras i figur 6-3.

Observationsmetoden bör användas när den har potential att minska osäkerheter i att rätt teknisk lösning används i rätt sammanhang och på rätt sätt. Den ska ges en tydlig roll och vara en integrerad del av såväl projektering som produktion, eftersom den slutgiltiga projekteringen fastläggs med aktiv anpassning till aktuella platsförhållanden. Valet av parametrar som ska observeras ska baseras på en tydlig analys av vilka problemställningar som är kritiska. Mätdata och analys ska ha tillräcklig kvalitet för att möjliggöra kvalificerade beslut. Endast därigenom kan observationer och mätningar medverka till att reducera osäkerheter om utformning och dimensionering av tunnlar och bergrum. Projektering med hjälp av observationsmetoden blir därför normalt mer krävande än projektering på basis av andra metoder /6-16/.

Tabell 6-2 visar som exempel en ansats till hur metodiken för observationsmetoden kan appliceras vid bergtätning med injektering.



Figur 6-3. Principen för och arbetsgången vid tillämpning av observationsmetoden.

Tabell 6-2. Observationsmetoden tillämpad på tätning av berg. Före, under och efter injektering kontrolleras bergets beteende mot förväntat beteende.

När	Prognos som ska verifieras	Krav	Observation, kriterier	Åtgärd när krav ej uppfylls
Före injektering	Det oinjekterade bergets beteende	Mätvärdena ska ligga inom angivna gränser för den prognosticerade klassen	Hydrauliska data och sprickdata från mätningar i sonderingshål	Bekräftelse eller ändring av injekteringsklass
Under injektering	Injekterings inträngning i bergmassans sprickor	Specifikationer för tryck, flöde och volym	Tryck, flöde, volym, återflöde	Justera injekterings-åtgärder inom aktuell injekteringsklass
Efter injektering, före berguttag	Täthet i tunneln som ska sprängas ut	Täthet i den injekterade zonen	Vattenförlust i kontrollhål	Ny injekteringsomgång i samma skärmläge
Efter injektering, efter berguttag	Inflöde till den utsprängda tunneln	Inflöde till aktuell tunnelsektion	Flöde mätt i mätdamm	Efterinjektering, "lining"

6.4 Metodik för projektering av övriga anläggningar

Konventionell projekteringsmetodik kan användas för stora delar av slutförvarets anläggningar, där förutsättningarna redan från början är tillräckligt väl kända. Det gäller i första hand infrastruktur och byggnader ovan mark samt tekniska installationer. Konventionell projektering innebär att utformningen och konstruktionen successivt görs allt mer detaljerad, fram till dess att det finns ett fullständigt underlag för att bygga anläggningen.

6.5 Huvudprocesser och viktiga delprocesser

6.5.1 Huvudprocesser

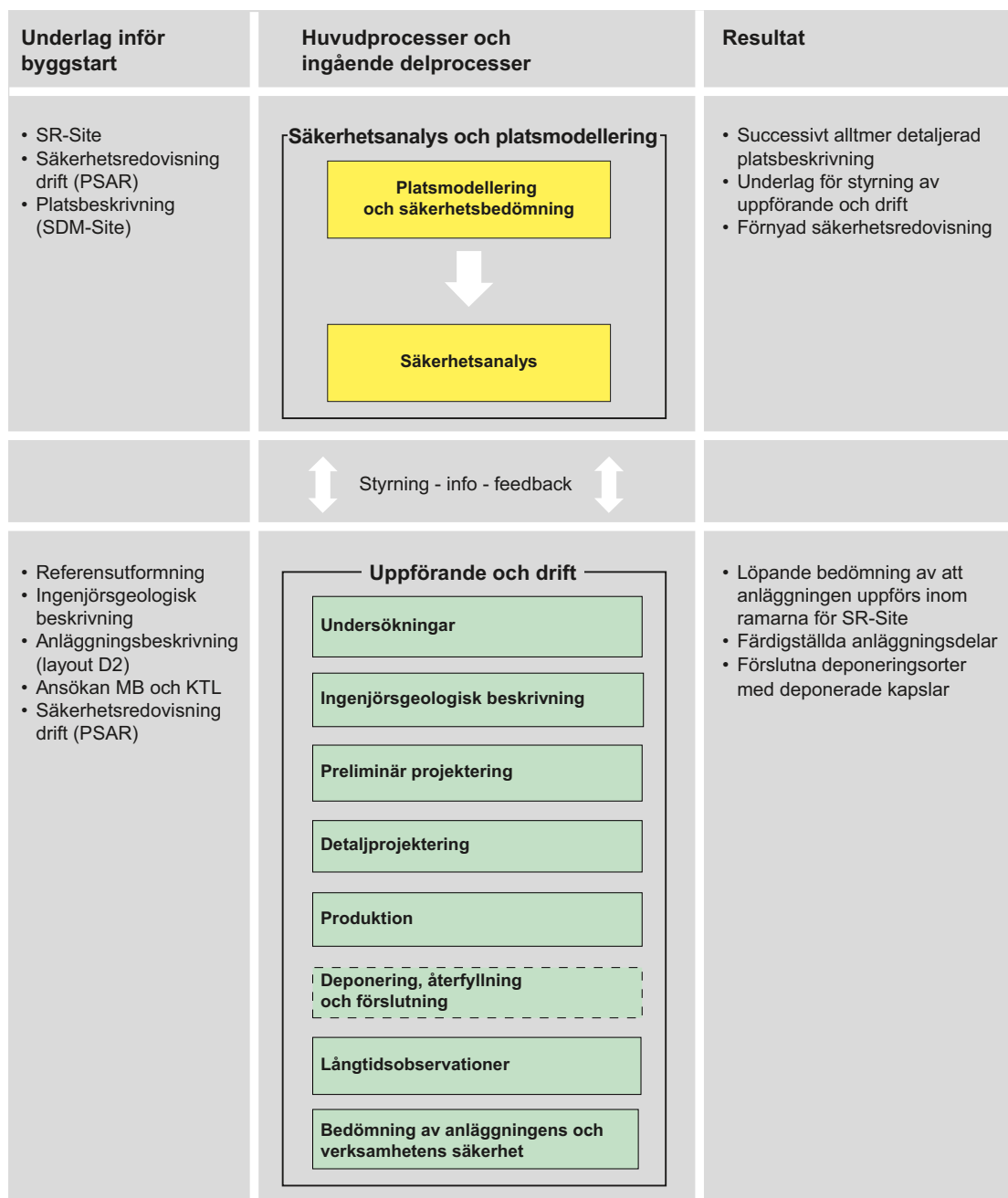
I den pågående planeringen för uppförande och drift av slutförvaret har verksamheten på en övergripande nivå delats in i två huvudprocesser:

- 1. Uppförande och drift.** Utbyggnaden av förvaret ska hela tiden ske i enlighet med givna tillstånd och villkor enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen och miljöbalken. Det innebär bland annat att utbyggnaden hela tiden ska ske inom de ramar som antagits i SR-Site eller senare säkerhetsanalyser, och med hänsyn till övriga krav och restriktioner för förvarets olika delar och konstruktioner. Detta kräver en tydlig, spårbar och kvalitetssäkrad arbetsmetodik. Genom att hela tiden stämma av verkligt utfall mot de antaganden som legat till grund för detaljprojekteringen kan utbyggnaden genomföras med god styrning och kontroll.
- 2. Säkerhetsanalys och platsmodellering.** Detta innebär att platsbeskrivningen regelbundet uppdateras och stäms av mot förutsättningar och antaganden i SR-Site samt att de antaganden som legat till grund för "preliminär säkerhetsredovisning drift" löpande stäms av mot faktiskt projekterad och uppförd anläggning. En förnyad säkerhetsredovisning – av såväl långsiktig säkerhet som driftsäkerhet – tas fram inför ansökan om provdrift eller om förutsättningarna i något skede bedöms ligga utanför ramarna av det som angivits i ansökan.

De två huvudprocesserna har i sin tur delats in i ett antal delprocesser. För varje process har viktiga aktiviteter och aktörer kartlagts. Vidare har det som behövs för att genomföra processerna identifierats, likaså vilka krav samt andra styrningar och begränsningar som gäller, vilka resurser

som behövs samt vad som kommer ut från respektive process, det vill säga resultaten. Hittills har planeringen fokuserat på utbyggnad av anläggningar under mark samt huvuduppgiften under drift, det vill säga deponering av kapslar och återfyllning.

En övergripande bild av de två huvudprocesserna och sambanden dem emellan ges i figur 6-4. De två huvudprocesserna genererar ett kontinuerligt flöde av information. Byggrelaterad information tas dagligen omhand av projektering och bygge. Anläggningen anpassas hela tiden till aktuella förhållanden. Platsbeskrivningens modeller (lokala, ämnesvisa modeller och detaljmodeller för tunnelavsnitt, del av deponeringsområde etc) kommer vid bestämda tidpunkter att uppdateras och stämmas av mot förutsättningarna i SR-Site. Baserat på aktuell platsbeskrivning, resultat



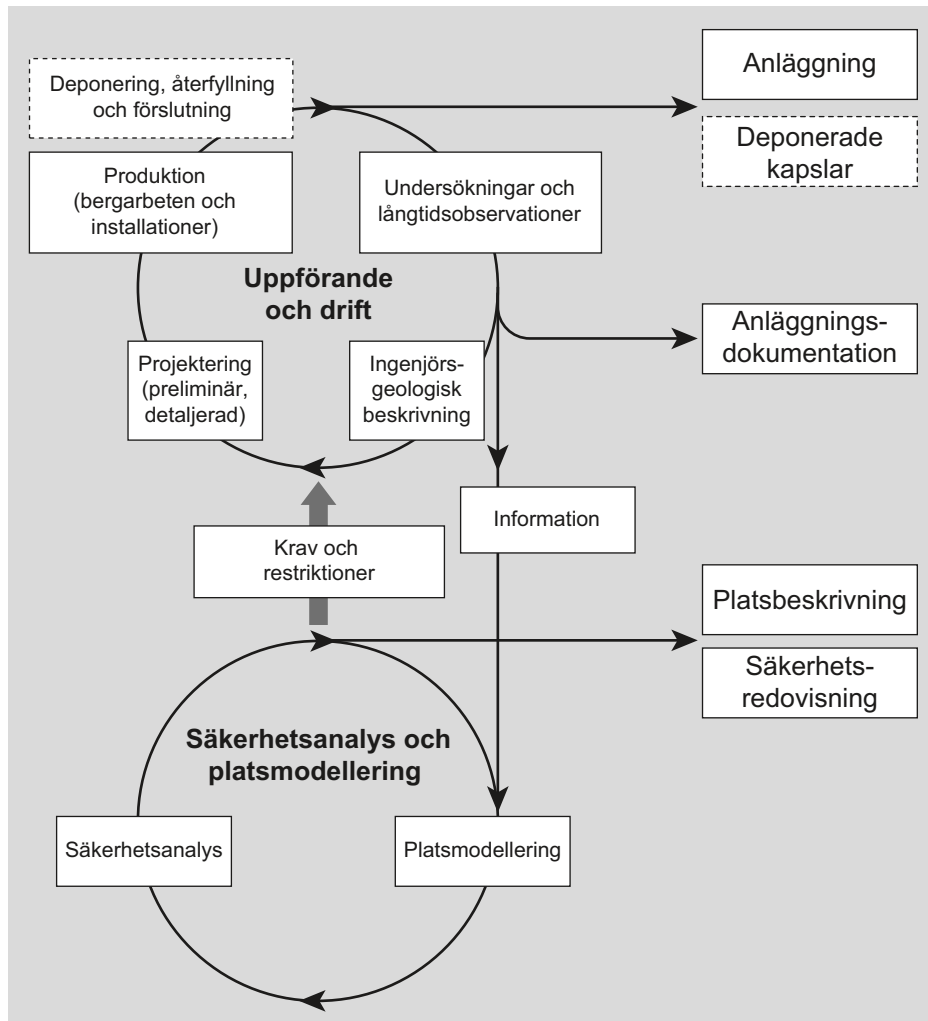
Figur 6-4. Huvudprocesser och viktiga delprocesser under uppförande och drift. Mellan de båda huvudprocesserna och deras delprocesser finns viktiga samband. I figuren illustreras detta förenklat genom texten "styrning, info, feedback". Den streckade linjen runt delprocessen "Deponering, återfyllning och förslutning" illustrerar att den inte är aktuell under uppförandeskedet.

från långsiktig säkerhetsanalys samt information och erfarenheter från utbyggnaden upprättas och uppdateras den ingenjörsgelogiska beskrivningen. Detta ger förutsättningarna för en styrd återkoppling från huvudprocess säkerhetsanalys och platsmodellering till huvudprocess uppförande och drift. Figur 6-5 illustrerar det iterativa arbetssättet samt viktiga samband och informationsflödet mellan de två huvudprocesserna.

I huvudprocessen uppförande och drift ingår under uppförandeskedet delprocesserna, se figur 6-6:

- Undersökningar
- Ingenjörsgelogisk beskrivning
- Preliminär projektering
- Detaljprojektering
- Produktion (bygge med alla ingående aktiviteter)
- Långtidsobservationer
- Bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet

Under driftskedet tillkommer delprocessen deponering, återfyllning och förslutning med tillhörande aktiviteter, se figur 6-7.



Figur 6-5. Viktiga samband och informationsflöde mellan de två huvudprocesserna under uppförande och drift. Den streckade linjen runt delprocessen "Deponering, återfyllning och förslutning" illustrerar att den inte är aktuell under uppförandeskedet.

Huvudprocess uppförande och drift - uppförandeskedet		
Underlag	Delprocess	Resultat
<ul style="list-style-type: none"> • Aktuell platsbeskrivning • Villkor i tillståndsbeslut • Undersökningsprogram • Resultat från produktionen 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #d9ead3; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Undersökningar</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Undersökningsresultat • Underlag för att uppdatera platsbeskrivningen • Underlag till detaljprojektering
<ul style="list-style-type: none"> • Aktuell platsbeskrivning • Undersökningsresultat 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #5cb85c; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Ingenjörsgelogisk beskrivning</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Ingenjörsgelogisk beskrivning • Underlag till preliminär projektering
<ul style="list-style-type: none"> • Aktuell ingenjörsgelogisk beskrivning • Aktuell referensutformning • Resultat från produktionen 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #4f81bd; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Preliminär projektering</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Underlag till detaljprojektering (layouter, kontrollprogram etc) • Underlag för upphandling • Underlag för att bedöma behovet av nya undersökningar
<ul style="list-style-type: none"> • Preliminär projektering • Resultat från undersökningar • Resultat från produktionen 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #4f81bd; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Detaljprojektering</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Bygghandlingar • Underlag för revidering av kontrollprogram
<ul style="list-style-type: none"> • Resultat från detaljprojekteringen (bygghandlingar) 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #ffc000; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Produktion</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Färdig anläggningsdel • Dokumentation • Underlag till huvudprocess att förnya säkerhetsredovisningen
<ul style="list-style-type: none"> • Aktuell platsbeskrivning • Villkor i tillståndsbeslut • Undersökningsprogram • Resultat från produktionen 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #d9ead3; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Långtidsobservationer</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Mätdata • Underlag för att uppdatera platsbeskrivningen • Underlag till detaljprojektering
<ul style="list-style-type: none"> • Resultat från produktion 	<div style="border: 2px dashed black; background-color: #fff2cc; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;">Bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet</div>	<p>Processen aktiveras endast när förhållandena avviker från gällande förutsättningar</p> <p>Alt 1: Produktionen kan fortsätta sedan anläggningens utformning och dimensionering reviderats</p> <p>Alt 2: Anläggningens utformning och dimensionering måste bedömas i delprocessen platsmodellering och säkerhetsbedömning</p>

Figur 6-6. Huvudprocess uppförande och drift – underlag, delprocesser och resultat under uppförandeskedet.

Huvudprocess uppförande och drift - driftskedet		
Underlag	Delprocess	Resultat
<ul style="list-style-type: none"> • Ansökan • Aktuell platsbeskrivning • Villkor i tillståndsbeslut • Undersökningsprogram 	<p style="text-align: center;">Samma delprocesser som under uppförande</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Färdig anläggningsdel • Dokumentation • Underlag till huvudprocess att förnya säkerhetsredovisningen
<ul style="list-style-type: none"> • Färdig deponeringsort • Färdiga kapslar med använt kärnbränsle • Säkerhetsredovisning • Drifrutiner och driftinstruktioner 	<p style="text-align: center;">Deponering, återfyllning och förslutning</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deponerade kapslar • Återfyllda deponeringsorter • Dokumentation
<ul style="list-style-type: none"> • Resultat från produktion och drift. 	<p style="text-align: center;">Bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet</p>	<p>Processen aktiveras endast när förhållandena avviker från gällande förutsättningar</p> <p>Alt 1: Produktion/drift kan fortsätta sedan anläggningens utformning och dimensionering reviderats</p> <p>Alt 2: Anläggningens utformning och dimensionering måste bedömas i delprocessen platsmodellering och säkerhetsbedömning</p>

Figur 6-7. Huvudprocess uppförande och drift – underlag, delprocesser och resultat under driftskedet.

I huvudprocessen säkerhetsanalys och platsmodellering, se figur 6-8, ingår delprocesserna:

- Platsmodellering och säkerhetsbedömning
- Säkerhetsanalys – långsiktig säkerhet

Huvudprocess säkerhetsanalys och platsmodellering		
Underlag	Delprocess	Resultat
<ul style="list-style-type: none"> • Aktuell platsbeskrivning • Resultat från undersökningar och långtidsobservationer • Resultat från produktionen • Underlag och frågor från delprocessen bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet i de situationer när förhållandena avviker från gällande förutsättningar och huvudprocess uppförande inte klarar att hantera frågan 	<p style="text-align: center;">Platsmodellering och säkerhetsbedömning</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Platsbeskrivning med modeller i detaljskala, tunnelskala, förvarsskala och regional skala • Underlag för undersökningar • Underlag för detaljprojektering • Styrning av huvudprocess uppförande och drift • Underlag för säkerhetsanalys
<ul style="list-style-type: none"> • Uppförd och projekterad anläggning • Aktuell platsbeskrivning • Fud-resultat 	<p style="text-align: center;">Säkerhetsanalys</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Förnyad säkerhetsredovisning inför ansökan om provdrift och om förvaret ligger utanför ramarna för vad som antagits i SR-Site • Styrning av huvudprocess uppförande och drift

Figur 6-8. Huvudprocess säkerhetsanalys och platsmodellering – underlag, delprocesser och resultat.

6.5.2 Viktiga delprocesser

Undersökningar

Delprocessen omfattar alla undersökningar, både de som behövs dagligen för bygget och de som behövs för att verifiera och uppdatera platsbeskrivningen.

Under de olika utbyggnads- och driftskedena kommer undersökningarnas syfte och inriktning att vara olika för olika delar av förvaret. Projekteringens och byggets behov kommer ständigt att vara i fokus. Undersökningar som huvudsakligen ger information med bäring på den långsiktiga säkerheten kommer att variera med tiden. I båda fallen är det viktigt att undersökningarna görs på den plats, det djup och i den skala som ger bäst förutsättningar att besvara aktuella frågor.

På en övergripande nivå syftar undersökningarna under bygge och drift till att ge det underlag som behövs för att uppföra slutförvaret och förnya säkerhetsredovisningen. Något mer detaljerat – och mot bakgrund av de förutsättningar som gäller för slutförvaret – har undersökningarna följande huvudsyften:

- att ge data från undersökningar under mark för att verifiera platsbeskrivningen från platsundersökningsskedet och uppdatera densamma,
- att, i huvudsak via uppdaterade platsbeskrivningar, ge underlag för att förnya och uppdatera säkerhetsanalysen,
- att ge det underlag i övrigt som behövs för att steg för steg projektera och bygga slutförvaret samt dokumentera den byggda anläggningen,
- att ge information till detaljerade modeller i olika skalor som underlag för slutlig placering av deponeringstunnlar, deponeringshål och övriga bergutrymmen,
- att ge underlag för att bedöma konsekvenser (påverkan på miljö och byggnader, förändrad grundvattennivå och grundvattenkemi med mera) av anläggningens utbyggnad.

Ingenjörsgelogisk beskrivning

I den ingenjörsgelogiska beskrivningen har informationen i platsbeskrivningen analyserats och tolkats till beskrivningar av och parametervärden för bergets stabilitet, hydrologi och termiska egenskaper. Vid tolkningen och analysen inarbetas resultat och erfarenheter från bergbyggande på platsen. Den ingenjörsgelogiska beskrivningen anger och motiverar de begränsningar som kan gälla avseende platsanpassning med hänsyn till bygge och långsiktig säkerhet. Den ingenjörsgelogiska beskrivningen kommer att uppdateras baserat på undersökningsresultat, uppdateringar av platsbeskrivningen, resultat från långsiktig säkerhetsanalys samt erfarenheter från utbyggnaden.

Den ingenjörsgelogiska beskrivningen utgör – tillsammans med den aktuella referensutformningen – underlag för att projektera och bygga varje anläggningsdel. Ramp och schakt kommer att uppföras, baserat på det underlag som finns i den platsbeskrivning och den ingenjörsgelogiska beskrivning som gäller vid tidpunkten för ansökan samt resultat från kompletterande ingenjörsgelogiska undersökningar. Anläggningsdelar som uppförs senare – centralområde och framför allt deponeringsområdena – kommer att uppföras baserat på information från den då aktuella platsbeskrivningen och på en uppdaterad ingenjörsgelogisk beskrivning.

Preliminär projektering

Den preliminära projekteringen är det första steget av projekteringen under uppförande och drift. Då projekteras en eller flera av anläggningsdelarna i enlighet med den ingenjörsgelogiska beskrivningen och referensutformningen. Den preliminära projekteringen leder fram till principritningar och övergripande tekniska specifikationer. Handlingarna ska vara så detaljerade att de för ramp, schakt och centralområde kan utgöra underlag för upphandling av leverantörer samt för att planera erforderliga undersökningsinsatser i tid och rum.

Den preliminära projekteringen inbegriper analyser av hur byggda tunnlar och bergrum beter sig, det vill säga bergets reaktion på uttag, förstärkning och tätning.

Detaljprojektering

Det andra steget av projekteringen under uppförande och drift är detaljprojektering. Den baseras på den preliminära projekteringen och den aktuella ingenjörsgelogiska beskrivningen. Detaljprojekteringen ger underlag till produktionen i form av dels ritningar och tekniska specifikationer, dels kontrollprogram och åtgärdsplaner.

Den grundläggande filosofin för att anpassa tunnlar och berggrum, med tillhörande förstärkning och tätning, är att osäkerheterna ska reduceras med utgångspunkt från observationer av kritiska konstruktionsparametrar och hur konstruktionerna beter sig under byggandet. Genom kontrollprogram och åtgärdsplaner styrs produktionen inom det utfallsrum som definierats med ledning av antaganden i säkerhetsanalys, referensutformning etc. Resultatet från kontrollprogrammet utgör underlag för att bedöma om konstruktionen uppför sig som förväntat, om åtgärder som beskrivs i åtgärdsplanen behöver sättas in eller om konstruktionen behöver anpassas eller ändras.

Produktion

Under produktion av de olika anläggningsdelarna genomförs tätning, berguttag och förstärkningsarbeten, se figur 6-9. Efter varje moment kontrolleras kvaliteten i utförandet i enlighet med framtagna kontrollprogram. Valet av berg- eller injekteringsklass för nästa produktionscykel beskrivs i ritningar eller tekniska specifikationer. Undersökningar och mätningar, som görs inom ramen för kontrollprogrammet, fokuserar på produktionen men lämnar även information till säkerhetsanalys och platsmodellering.

Drift

Driften omfattar alla aktiviteter som behövs för att deponera kapslar och försluta förvaret. Verksamheten beskrivs i kapitel 10.

Långtidsobservationer

Långtidsobservationer (monitering) ger kunskap om ostörda förhållanden i naturen och säsongsvariationer. Observationerna används för att detektera förändringar relativt tidigare insamlade primära jämförelsedata och för att särskilja naturliga förändringar från mänskligt orsakade. De är således ett sätt att öka förståelsen av platsen och att visa att ställda krav är uppfyllda. En annan viktig uppgift är att ge information inför beslut att gå vidare till nästa steg.

Långtidsobservationerna inleddes under platsundersökningarna och kommer, fram till ansökan, att fortsätta i både Forsmark och Oskarshamn. Därefter fortsätter de på den valda platsen fram till byggstart. Därmed kommer det, när bygget inleds, att finnas ett känt utgångsläge med tidsserier som beskriver naturliga variationer vid den valda platsen.

Långtidsobservationerna kommer sedan att pågå kontinuerligt under slutförvarets bygg- och driftskeden. En viktig del i moniteringsprogrammet är att – under bygge och drift – noga registrera alla relevanta händelser som kan påverka någon mätparameter. Moniteringsprogrammets omfattning kommer regelbundet att anpassas med ledning av resultat och andra erfarenheter från gjorda observationer. För att studera naturliga variationer kommer vissa mätningar också att göras inom ett referensområde.

Bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet

För vissa situationer är det möjligt att den arbetsmetodik som beskrivs i avsnitt 6.3 inte ger det underlag som behövs för att fortsätta projekteringen och bygget. Om undersökningar och mätningar visar att berget eller en konstruktion inte ligger inom det utfallsrum som antagits för konstruktionen och som kan hanteras med förutbestämda åtgärdsplaner, måste SKB ändå kunna bedöma och fatta beslut om vilka åtgärder som ska vidtas. Därför har processen bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet skapats. Processen kommer att ha tillgång till kompetens inom säkerhetsanalys, platsmodellering, projektering och produktion. I de fall då det krävs mer omfattande analyser för att bedöma om anläggningens utformning och dimensionering måste ändras, överlämnas frågan till processen platsmodellering och säkerhetsbedömning.

Produktionsprocessen		
Underlag	Delprocess	Resultat
<ul style="list-style-type: none"> • Detaljprojektering inklusive kontrollprogram • Kontrollprogram tätning • Åtgärdsplan tätning 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #d9ead3; padding: 10px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">Tätning</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #5cb85c; padding: 10px; text-align: center;">Kontroll av tätning</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Tätat tunnelavsnitt <p>Alt 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inläckage till tunnelavsnittet och vattenförlust i sonderingshål ligger inom angivna gränser => Godkänd tätning <p>Alt 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tätningen uppfyller inte ställda krav => Täta på nytt. Eventuellt kan tätningsåtgärder enligt kontrollprogrammet behöva justeras
<ul style="list-style-type: none"> • Detaljprojektering • Tätat tunnelavsnitt • Borrplan • Ladd- och tändplan • Kontrollprogram berguttag (stabilitet, geometri, vibrationer, skadezon etc) • Åtgärdsplan berguttag 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #fff2cc; padding: 10px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">Berguttag</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #ffeb3b; padding: 10px; text-align: center;">Kontroll av berguttag</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Utsprängt och utlastat tunnelavsnitt <p>Alt 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tunnelavsnittet ligger inom angivna gränser <p>Alt 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tunnelsektionen uppfyller inte ställda krav => vidta erforderliga åtgärder
<ul style="list-style-type: none"> • Detaljprojektering inklusive kontrollprogram • Kontrollprogram bergförstärkning (belastning, stabilitet etc) • Åtgärdsplan bergförstärkning 	<div style="border: 1px solid black; background-color: #ffcc80; padding: 10px; text-align: center; margin-bottom: 10px;">Förstärkning</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #ff9800; padding: 10px; text-align: center;">Kontroll av förstärkning</div>	<ul style="list-style-type: none"> • Förstärkt tunnelavsnitt <p>Alt 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Färdigt tunnelavsnitt • Anläggningsdokumentation <p>Alt 2</p> <p>Förstärkningen uppfyller inte ställda krav => genomför åtgärder enligt kontrollprogram. Eventuellt kan förstärkningsåtgärder enligt kontrollprogrammet behöva justeras</p>

Figur 6-9. Produktionsprocessen nedbruten i delprocesser.

Platsmodellering och säkerhetsbedömning

Platsmodellering omfattar analys och utvärdering både av den information som kontinuerligt produceras under uppförande och drift av förvaret och den som erhålls genom riktade undersökningar i till exempel kärnborrhål. Arbetet utgår från den platsbeskrivning som tas fram efter avslutade platsundersökningar (SDM-Site) och som kommer att utgöra underlag till SR-Site.

Om de aktuella förhållandena vid något tillfälle under utbyggnaden avviker från gällande förutsättningar – och situationen inte kan hanteras inom huvudprocessen uppförande och drift – görs bedömningen inom delprocessen platsmodellering och säkerhetsbedömning.

Säkerhetsanalys – långsiktig säkerhet

Tillståndet att uppföra och driva förvaret baseras på bland annat SR-Site. Som underlag för ansökan om provdrift krävs en förnyad säkerhetsredovisning. Så länge som förutsättningarna i SR-Site förblir uppfyllda avser SKB inte att ta fram någon förnyad säkerhetsredovisning för tiden däremellan. Den löpande uppföljningen och kontrollen sker inom processen bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet, se ovan.

En fortsatt utveckling av säkerhetsanalysen, inklusive metoder och modeller som används i analysen, kommer att pågå under i stort sett hela tiden som förvaret uppförs och drivs. Denna utveckling baseras på resultatet från det pågående Fud-programmet samt på de erfarenheter som utbyggnad och drift av förvaret ger.

6.6 Kvalitetsstyrning

Under utbyggnaden och driften av slutförvaret kommer det att ställas höga krav på styrning av verksamheten. Informationsflödet mellan alla aktörer – projektering, bygge, undersökningar, modellering och säkerhetsanalys – måste ske enligt fastställda rutiner och med stora krav på spårbarhet, dokumentation och kvalitetssäkring. Vidare måste arbetssättet anpassas till de speciella villkor som gäller för projektering och byggande av undermarksanläggningar.

Det arbetssätt som SKB planerar för utbyggnaden av slutförvaret och som beskrivs ovan har som utgångspunkt att kunna hantera dessa krav. För att förverkliga detta kommer SKB att behöva en väl genomtänkt organisation med ett tydligt utpekat ansvar och ett effektivt och så långt möjligt användarvänligt ledningssystem. Organisation och ledningssystem ska utformas med hänsyn till de krav som gäller för att uppföra och driva kärntekniska anläggningar. Särskilt höga blir kraven när provdriften startar och bergbyggnaden ska pågå parallellt med att vi deponerar kapslar med använt kärnbränsle.

SKB har i dag ett ledningssystem som är certifierat enligt kvalitetslednings- och miljöledningsstandarderna ISO 9001 och ISO 14001. Den 1 januari 2007 övertog SKB driften av Clab i egen regi. I samband med det infördes ett nytt ledningssystem med rutiner som krävs för att driva kärnteknisk verksamhet, det vill säga ett ledningssystem som lever upp till alla relevanta krav i SSI:s och SKI:s föreskrifter.

Dagens ledningssystem kommer att utgöra en viktig bas för den organisation och det ledningssystem som SKB behöver för att bygga slutförvaret, liksom övriga anläggningar inom kärnbränsle- och Loma-programmen. I en bilaga till ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen redogjorde SKB för hur företaget avser att leva upp till säkerhetskraven /6-2/, när det gäller organisation, ledning, styrning under uppförandet och driftsättningen av inkapslingsanläggningen. Uppförandet och driftsättningen kommer att ske parallellt med den pågående driften av Clab. En motsvarande redovisning kommer att finnas i ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret.

I SKB:s ledningssystem finns funktioner och rutiner för att vidareutveckla ledningssystemet. Inom ramen för detta förbättringsarbete kommer ledningssystemets ändamålsenlighet och effektivitet regelbundet att utvärderas. Nya och förändrade interna krav och myndighetskrav, liksom erfarenheter från både den egna och andra organisationer, kommer kontinuerligt att utvärderas. Resultaten från utvärderingarna kan resultera i att organisationen och ledningssystemet förändras.

6.7 Safeguard för slutförvaret

Med safeguard avses åtgärder för att förhindra att kärnämne kommer i orätta händer. Krav på åtgärder med hänsyn till bland annat safeguard finns i SKI:s föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar /6-1/ och SKI:s föreskrifter om fysiskt skydd av kärntekniska anläggningar /6-17/.

Genom IAEA drivs internationellt arbete där SKB deltar för att definiera kraven på safeguard-systemet för ett geologiskt förvar. Vidare har SKB ett samarbete med Posiva i safeguardfrågor för inkapsling och slutförvar och följer utvecklingen vid Onkaloanläggningen.

Ett väl fungerande safeguardsystem har en helhetssyn för hela bränslehanteringskedjan, från bränslefabrik till och med slutförvaring av det använda kärnbränslet.

Principen för safeguard vid slutförvaret är ”Continuity of Knowledge, CoK”. Den fyllda kapseln kan förses med ett sigill vid inkapslingsanläggningen och genom att verifiera att sigillet är obrutet vid deponeringen kan man förvissa sig om att kapseln med innehåll kommit fram till slutförvaret i oförändrat skick.

I samband med utformningen och byggandet av slutförvaret kommer berörda myndigheter och SKB att bestämma platser för nyckelmätpunkter för safeguardsystemet så att ”Continuity of Knowledge” kan uppfyllas och myndigheternas övervakningskrav kan tillgodoses.

Från safeguardsynpunkt är det viktigt att kunna verifiera att slutförvarsanläggningen har byggts i enlighet med de ritningar som presenterats, så att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har angivits, eller att det förekommer utrymmen där annan verksamhet förekommer än vad som har angivits. Detta kan ske på liknande sätt som nu sker vid byggandet av den finländska slutförvarsanläggningen Onkalo, genom exempelvis inmätningar av bergutrymmen och bestämning av mängden bortsprängt berg. Myndigheter kan då genomföra inspektioner vid regelbundna tillfällen innan och under slutförvarets byggande, drift och förslutning för att verifiera uppgifterna.

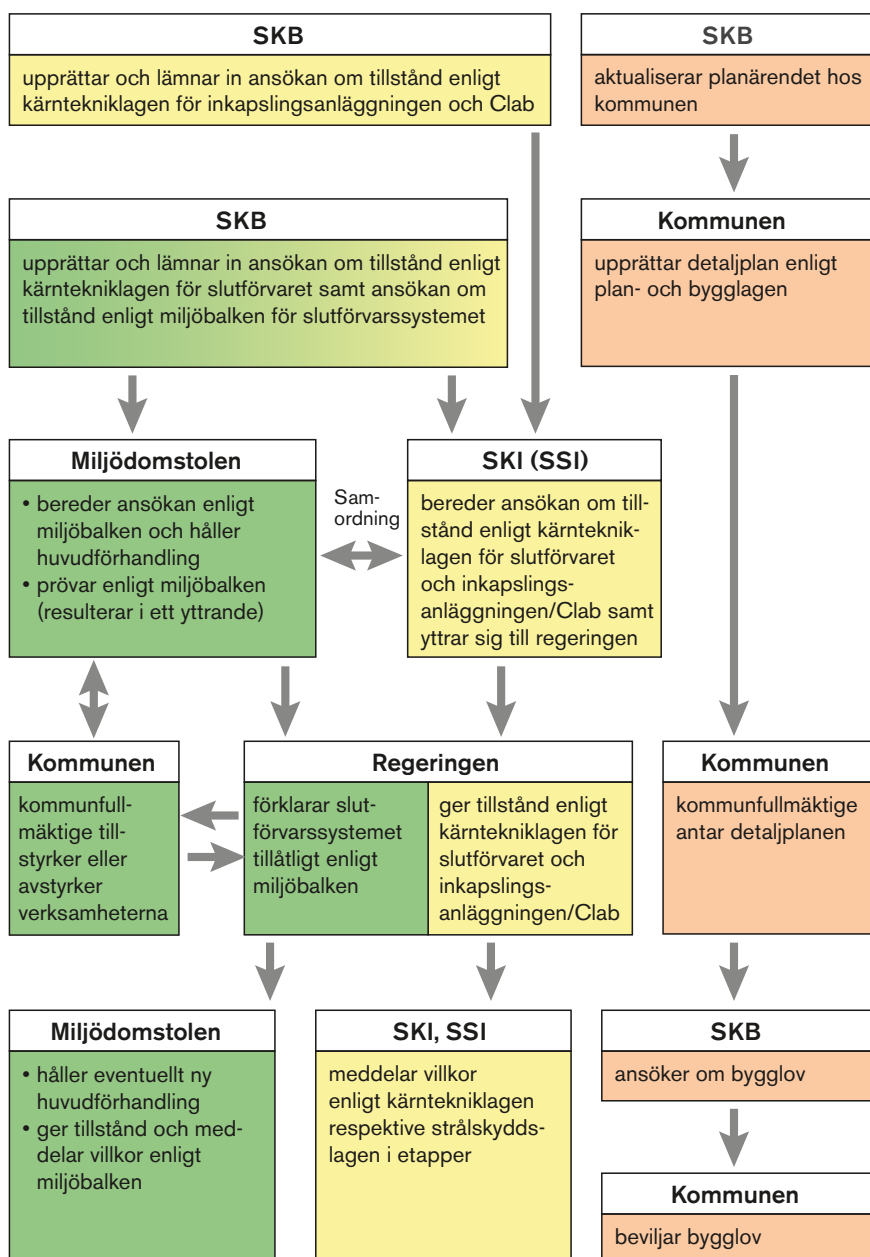
I systemet utgör kapseln en redovisningsenhet. Varje kapsel har en unik beteckning som noteras och dess innehåll dokumenteras. Förflyttningen av kapslar dokumenteras i safeguardredovisningen. Kapselns unika beteckning dokumenteras och kontroll av att sigillet är obrutet görs när kapseln lyfts upp ur transportbehållaren i slutförvaret och deponeras.

Ett eventuellt återtag av deponerade kapslar ställer också krav på safeguardsystemet. Det gäller att otvetydigt kunna fastställa identiteten på de kapslar som tas upp. Detta ställer krav på att märkningen av kapslarna är beständig i långtidsperspektivet. Detsamma gäller för informationen om kapselns innehåll. I övrigt kan samma principer tillämpas vid återtag som gäller för de olika momenten vid deponering av kapslarna.

7 Huvudskede tillståndsprövning

Tillståndsprövningen av slutförvaret, inkapslingsanläggningen och Clab kommer att bli en omfattande process, eftersom det är en komplex, unik och omfattande verksamhet som ska prövas. Prövningen inleddes hösten 2006 när SKB lämnade in en ansökan enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen och Clab.

För att etablera och driva verksamheten vid slutförvaret fordras – liksom för inkapslingsanläggningen och Clab – tillstånd både enligt kärntekniklagen och enligt miljöbalken. Därutöver behöver verksamheten vara förenlig med kommunens gällande detaljplan och områdesbestämmelser samt ha beviljats bygg- och marklov. Figur 7-1 illustrerar prövningsprocessen för slutförvaret, Clab och inkapslingsanläggningen.



Figur 7-1. Prövningsprocessen för slutförvaret, inkapslingsanläggningen och Clab.

Tillstånd enligt kärntekniklagen söks hos regeringen och bereds av SKI. När SKI fått in ansökan för slutförvaret inleder de sin granskning av ansökan. Eventuellt skickar SKI materialet på en kompletteringsrunda till andra myndigheter som är remissinstanser i prövningen. Därefter kan SKI begära kompletteringar från SKB. När SKI bedömer att materialet är komplett skickar de ut det på remiss, varefter SKB ges tillfälle att bemöta remissinstansernas yttranden. Sedan överlämnar SKI ärendet till regeringen med ett eget yttrande.

Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken söks hos regeringen och handläggs av miljödomstolen. Även miljödomstolen kan skicka materialet på kompletteringsrunda innan ansökan remitteras till berörda myndigheter och sakägare. SKB ges tillfälle att bemöta inkomna yttranden. Miljödomstolen håller en huvudförhandling, varefter miljödomstolen överlämnar ärendet och sitt yttrande till regeringen.

Formellt ska regeringen besluta om:

- tillstånd enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen och Clab,
- tillstånd enligt kärntekniklagen för slutförvaret samt,
- om den sökta verksamheten är tillåtlig enligt miljöbalken.

En viktig förutsättning vid regeringens tillåtlighetsprövning enligt miljöbalkens 17:e kapitel är att regeringen – som grundregel – får tillåta en verksamhet endast om kommunfullmäktige i berörd kommun har tillstyrkt verksamheten.

Enligt förarbetena till miljöbalken bör tillståndsprövningen enligt kärntekniklagen och tillåtlighetsprövningen enligt miljöbalken samordnas så att både miljödomstolen och den berörda kommunen har tillgång till SKI:s och SSI:s yttranden i målet rörande tillstånd enligt kärntekniklagen innan de tar ställning och avger sina yttranden i tillåtlighetsfrågan enligt miljöbalken. Även regeringens beslut enligt de båda lagarna bör ske samordnat /7-1, sid 271/. Hur detta ska gå till i praktiken är en fråga som SKB kommer att diskutera närmare med berörda instanser. Frågor om samordning och avgränsning mellan miljöbalken och kärntekniklagen respektive strålskyddslagen har hittills prövats endast i ett fåtal ärenden.

Om regeringen ger tillstånd enligt kärntekniklagen och beslutar om tillåtlighet enligt miljöbalken kommer ärendena återigen att överlämnas till SKI respektive miljödomstolen. Miljödomstolen fastställer vilka villkor som ska gälla för verksamheten enligt miljöbalken. Detta kan ske i en slutlig dom eller i en deldom. Det senare är aktuellt om domstolen finner att vissa frågor rörande villkoren för verksamheten måste utredas under en så kallad prøvotid. När sökanden sedan redovisat kompletterande underlag fastställs slutliga villkor i en slutlig dom. När det gäller prövningen enligt kärntekniklagen kan såväl regeringen som SKI och SSI komma att meddela villkor eller föreskrifter för att reglera verksamheten.

För att verksamheten ska kunna ges tillstånd får den inte strida mot gällande detaljplan eller områdesbestämmelser. Detta är också en förutsättning för att bygglov ska kunna beviljas av kommunen. Ärenden om planer respektive mark- och bygglov kommer att hanteras parallellt med att prövningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken förbereds och pågår hos myndigheter, miljödomstol och regering.

7.1 Milstolpar

Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Kommunfullmäktige beslutar att tillstyrka verksamheten.
- Regeringen beslutar om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen.
- Kommunen antar detaljplan.
- Miljödomstolen ger tillstånd och meddelar villkor enligt miljöbalken.
- SKI meddelar villkor enligt kärntekniklagen.
- SSI meddelar villkor enligt strålskyddslagen.
- SKB lämnar in ansökan om bygglov.
- Kommunen beslutar om bygglov.

7.2 Verksamhet

När ansökningarna för slutförvaret enligt kärntekniklagen och för slutförvaret, inkapslingsanläggningen och Clab enligt miljöbalken lämnats in kommer SKB dels att medverka i tillståndsprocessen och dels att förbereda uppgiften att uppföra slutförvaret. Att medverka i tillståndsprocessen innebär att svara på SKI:s, miljödomstolens, remissinstansernas och allmänhetens frågor, att lämna in de kompletteringar som prövningsmyndigheterna eventuellt begär samt att delta i huvudförhandling i miljödomstolen.

Att tillståndsprövningen pågår samtidigt som SKB planerar, organiserar och projekterar anläggningar och verksamheter i slutförvarssystemet innebär begränsningar och osäkerheter. En självklar begränsning är att SKB inte kan påbörja aktiviteter som föregriper utfall och villkor i kommande tillståndsbeslut. Hur lång tid tillståndsprövningen pågår och utfallet av processen när ansökan väl är inlämnad är en osäkerhet som vi måste acceptera. Genom att snabbt besvara önskemål om kompletteringar med mera kan dock SKB medverka till att processen inte i onödan förlängs.

För att kunna genomföra effektiva och rationella förberedelser för att bygga förvaret planerar vi förberedande arbeten på den valda platsen. SKB kan behöva ansöka om och få erforderliga tillstånd (schaktlov, marklov, bygglov, tillstånd att anlägga vägar etc) för dessa innan verksamheten kan påbörjas.

Uppförandet av slutförvaret kommer att ställa andra krav än dagens på SKB:s organisation och verksamhet, se kapitel 6. Det gäller exempelvis informationsflödet mellan arbetet med miljö- och tillståndsfrågor, undersökningar, modellering, projektering, bygge och säkerhetsanalys. En central uppgift blir därför att genom rekrytering och utbildning bygga upp en organisation för uppförandeskedet.

Projekteringen av slutförvaret kommer att drivas vidare. För de anläggningsdelar som ska byggas först kommer bygghandlingar att färdigställas och upphandlingen av entreprenörer och andra leverantörer att förberedas. Under mark gäller det tillfarterna till förvarsområdet.

Monitering av grundvatten i borrhål och andra långtidsobservationer kommer att fortsätta i samma omfattning som under slutskedet av platsundersökningarna. En uppgift tidigt under skedet blir att utföra kompletterande ingenjörsgelogiska undersökningar till stöd för detaljprojekteringen av schakt och ramp.

7.3 Teknikbehov

Efter att ansökningarna lämnats in kan resultaten från säkerhetsanalysen SR-Site ligga till grund för att uppdatera de krav som ställs på tekniken. Teknikutvecklingen går därefter in i ett skede som syftar till att ta fram maskiner och processer som uppfyller de reviderade kraven. En annan viktig uppgift blir att ta fram de kontrollprogram som behövs för att verifiera att kraven uppfylls under uppförande och drift.

Skedet avslutas i och med att SKB erhållit alla tillstånd som behövs för byggstart. Då måste teknik för att producera tillfarterna till förvaret – skipschakt och ramp – vara vald och väl förberedd. Dessa anläggningsdelar ligger på den tidsmässigt kritiska linjen under uppförandeskedet och drivningen kommer därför att inledas så snart som möjligt. Tidsplanen förutsätter att skipschaktet byggs som sänkschakt.

Tabellerna 7-1 till och med 7-4 sammanfattar planerad status som ska uppnås under tillståndsprövningen för teknik som ska tillämpas vid bygge och drift. Detta är liktydigt med status inför byggstart. Formatet för tabellerna är detsamma som i avsnitt 5.3.

Tabell 7-1. Teknik för bergarbeten – planerad status inför tillstånd/byggstart.

Teknik	Planerad status inför tillstånd/byggstart	Hänvisning till avsnitt i del III
Undersökningar		
Målet för SKB:s insatser inom området är att i god tid före byggstart ha utvecklat och provat instrument och metoder för undersökningar från schakt och ramp.		
Undersökningar i borrhål	Instrument och metoder som behövs för undersökningar från ramp och schakt är klara att tas i bruk.	12.3
	För instrument och metoder som behövs för undersökningar under utbyggnad på försvarsnivå pågår anpassning och utveckling.	12.3
Undersökningar i tunnlar och deponeringshål	Ett väl fungerande system för laserskanning med enkel överföring av data till SKB:s modelleringssystem är testat och klart att tas i bruk.	12.3.2
	Rationella metoder för att genom deformationsmätningar i samband med tunneldrivning bestämma spänningstillståndet i berget är valda och klara att tas i bruk.	12.3.4
	Förbättrad metod för mätning av vattenflöden i ramp och tunnlar har utprovats och är klar att tas i bruk.	12.3.7
	Utvecklingen av metodik och metoder för mätning av inflöde till deponeringstunnlar och deponeringshål pågår.	12.3.7, 12.3.8
Informationssystem och informationsteknik	Informationssystem som behövs inför byggstart är utprovade och klara att tas i drift.	12.3.11
Berguttag		
Målet för SKB:s insatser inom området är att vid byggstart ha demonstrerat (i Äspölaboratoriet) och valt metoder för berguttag i tillfarter och centralområde. Referensmetod för berguttag i deponeringstunnlar vald. Metoder för karakterisering av störd zon (EDZ) valda.		
Teknik för bormning och sprängning	Intrimning av personal och maskiner för försiktig tunneldrivning pågår.	11.1, 12.5
Störd zon	Metod och teknik för karakterisering av störd zon vald och utprovad.	12.5
Bormning av deponeringshål	Prototyp av utrustning för bormning tillverkad. Intrimning av personal och maskin förberedd.	11.1, 12.7
Bergförstärkning		
Målet för SKB:s insatser inom området är att har provat valda material med lågt pH vid Äspölaboratoriet samt påbörjat eventuella långtidstester.		
Material till bergförstärkning	Bergförstärkning (sprutbetong, nätning och bergbult) med material, som uppfyller kraven på lågt pH demonstrerad. Provområdena övervakas och materialets utveckling registreras.	12.6
Sprutbetong	Utrustning för bruk med lågt pH utprovad.	12.6
Tätningsteknik		
Målet för SKB:s insatser inom området är att inför byggstart ha valt och demonstrerat tätningsteknik, inklusive material, för de förhållanden som förväntas på den aktuella platsen.		
Teknik och material för tätning av vattenförande sprickor och zoner	Kunskap om och erfarenhet av injektering, bland annat från Onkalo, har sammanställts. Ytterligare några injekteringsmaterial (förutom silica sol) valda, provade och utvärderade från injekterings-synpunkt.	11.1, 12.4
Teknik och material för tätning av stora zoner med stark vattenföring	Tätningsteknik för zoner/egenskaper som förväntas på den aktuella platsen vald.	11.1, 12.4

Tabell 7-2. Teknik för buffert – planerad status inför tillstånd/byggstart.

Teknik	Planerad status inför tillstånd/byggstart	Hänvisning till avsnitt i del III
Produktion och hantering ovan mark		
Målet för SKB:s insatser inom området är att de anläggningar och utrustningar som behövs för produktion och hantering vid slutförvaret ska vara detaljprojekterade.		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Preliminär projektering klar. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Preliminär projektering klar. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Pressning – block och ringar och pelletar	Produktionsanläggning detaljprojekterad och uppförande förberett.	11.2, 13.3
Mellanlagring – block, ringar och pelletar	Lager och utrustningar detaljprojekterade och klara att byggas/tillverkas.	13.4
Hantering och applicering – deponeringshål		
Inredning	Utprovning pågår.	13.5
Installation – block och ringar	Eventuellt fortsatt verifiering av att referensmetoden uppfyller konstruktionskraven. Prototyp av greppverktyg testat och prototyp-maskin för buffertnedläggning under konstruktion.	13.6 11.2
Förslutning – tillfälligt buffertskydd	Eventuella tester med uppvärmning pågår.	13.5
Installation – pelletar/granuler	Tester av referensmetod och utrustning pågår.	13.7

Tabell 7-3. Teknik för kapselhantering och deponering vid slutförvaret – planerad status inför tillstånd/byggstart.

Teknik	Planerad status inför tillstånd/byggstart	Hänvisning till avsnitt i del III
Målet för SKB:s insatser inom området är att i god tid före utbyggnaden av deponeringsområdet ha testat hela hanteringskedjan, från överföring av kapseln från transportbehållare till deponeringsmaskinens strålskyddstub och deponering av kapseln i ett deponeringshål med buffert.		
Hantering av transportbehållare ovan mark och nedtransport i ramp	Detaljkonstruktion och förberedelser för tillverkning av utrustning för terminalbyggnad samt fordon för ramptransport pågår.	14.8
Omlastningsstation och utrustning för att flytta kapslar från transportbehållare till deponeringsmaskin.	Förenklad omlastningsstation byggd vid Äspölaboratoriet och viktiga komponenter utprovade.	14.8
Deponeringsmaskin och övrig utrustning för att installera buffert och deponera kapslar	Ny maskin och övrig utrustning tillverkad i prototyputförande. Tester med denna utrustning genomförs vid Äspölaboratoriet, som underlag för slutlig utformning.	11.3, 14.8

Tabell 7-4. Teknik för återfyllning – planerad status inför tillstånd/byggstart.

Teknik	Planerad status inför tillstånds/byggstart	Hänvisning till avsnitt i del III
<i>Produktion och hantering ovan mark</i>		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Preliminär projektering klar. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Preliminär projektering klar. Känd och kommersiellt tillgänglig teknik.	–
Pressning – block till övre del av deponeringshål	Produktionsanläggning detaljprojekterad och uppförande förberett.	15.3
Pressning – block för deponeringstunnel	Produktionsanläggning detaljprojekterad och uppförande förberett.	15.3
Mellanlagring – block, pelletar/ granuler	Lager och utrustningar detaljprojekterade och klara att byggas/tillverkas.	15.4
<i>Hantering och applicering – deponeringstunnel</i>		
Borttag av dränage och tillfälligt buffertskydd	Eventuellt långtidstest av konsekvenser av kvarblivet material pågår.	15.5
Återfyllning – övre del av deponeringshål	Eventuell fortsatt verifiering av att referensmetoden uppfyller konstruktionskraven.	15.6
Återfyllning – block i tunnel	Eventuell fortsatt verifiering av att referensmetoden uppfyller konstruktionskraven. Eventuell ny prototypinstallation genomförd.	11.4, 15.6
Återfyllning – pelletar/granuler i tunnel	Genomfört i eventuell ny prototypinstallation.	15.7
Förslutning – temporär plugg i tunnel	Förslutning enligt referens byggd vid Äspölaboratoriet.	11.4, 15.8

8 Huvudskede uppförande

När SKB fått erforderliga tillstånd, upphandlat de första entreprenaderna och genomfört övriga förberedelser för byggstart kan uppförandeskedet börja. Skedet löper under mellan sex och sju år och domineras av omfattande bergarbeten. Cirka 0,5–0,7 miljoner kubikmeter bergmassor (fast mått) ska transporteras upp via anläggningens tillfarter. Samtidigt utförs kartering och undersökningar för att detaljera kunskapen om platsen.

8.1 Milstolpar

Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Etablering och byggstart.
- Skipschakt klart.
- Start bergarbeten på förvarsnivå.
- Ramp klar.
- Centralområdet klart.
- Produktionsbyggnaden klar.
- Förnyad säkerhetsredovisning.
- Anläggningar och installationer (inkl deponeringspositioner) för samfunktionsprovning klara.
- Ovanjordsanläggningar klara.

8.2 Verksamhet

8.2.1 Undersökningar

Undersökningarnas omfattning och inriktning är avhängigt vilka osäkerheter som kvarstår efter platsundersökningsskedet. Undersökningsprogrammet blir därför platsspecifikt och kan upprättas i detalj först när modellering, projektering och säkerhetsanalys (SR-Site) – baserat på data från platsundersökningarna – har slutförts.

De undersökningar som kan bli aktuella kan grovt delas in i följande kategorier:

1. Undersökningar (tunnelkartering, sonderingsborrning etc) som är direkt relaterade till bergarbetenas framdrift. Sådana undersökningar görs kontinuerligt.
2. Undersökningar som är relaterade till detaljprojektering av en tunnel eller annan anläggningsdel. Sådana undersökningar (till exempel långa kärnborrhål borrade inom tunnelperiferin) görs endast för särskilda frågeställningar, exempelvis för att verifiera genomförbarheten för tunneldrivningen (passage av vattenförande zon, höga bergspänningar etc).
3. Undersökningar för säkerhetsanalys och platsmodellering. Sådana undersökningar kommer att utföras av olika skäl, till exempel för att besvara nyckelfrågor som ställts redan före byggstart eller frågor som identifierats inom huvudprocess säkerhetsanalys och platsmodellering eller i projekteringen.
4. Undersökningar relaterade till deponeringsprocessen. Dessa undersökningar ska ge underlag till detaljprojektering av deponeringstunnlar och utplacering av deponeringspositioner. Detaljkartering av deponeringstunnlar och deponeringshål syftar både till att verifiera att tunnlar och hålen uppfyller ställda krav och att dokumentera dem.
5. Monitering (långtidsobservationer) genomförs för att dokumentera hur uppförande och drift av slutförvaret påverkar områdets ekosystem, mark och berggrund. Monitering pågår kontinuerligt och ger även viktig information till de hydrogeologiska och hydrogeokemiska modellerna.

8.2.2 Långtidsobservationer

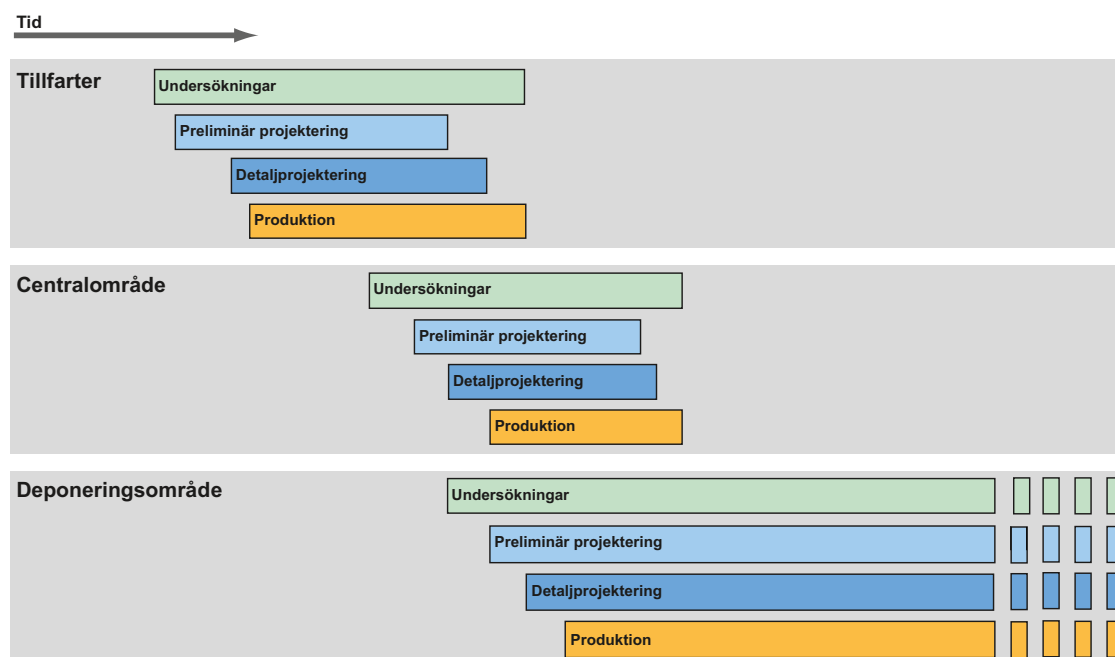
Långtidsobservationer under uppförandeskedet fokuserar på att förstå hur hydrogeologiska, hydrogeokemiska och bergmekaniska faktorer påverkar förvarets långsiktiga funktion, men omfattar också dokumentation av de störningar som utbyggnaden av förvaret medför samt kontroll av miljöpåverkan. Under driftskedet kan långtidsobservationer av temperatur, mikroseismik, grundvattentryck etc pågå, liksom kontroll av återmättnad och tryckupbyggnad i återfyllningen.

8.2.3 Projektering

För alla anläggningsdelar genomförs preliminär projektering och detaljprojektering enligt beskrivningen i avsnitt 6.2 till och med 6.5. Anläggningsdelarna kommer att befinna sig i olika skeden och därmed är utformningen olika detaljerad, se figur 8-1. För de anläggningsdelar och projekteringsfrågor där det finns kvarstående osäkerheter tillämpas observationsmetoden, se avsnitt 6.3.3. Vilka anläggningsdelar och frågor detta gäller kan inte preciseras förrän tidigast när layout D2 och SR-Site är klara.

8.2.4 Platsmodellering, säkerhetsbedömning och säkerhetsanalys

Platsmodellering och säkerhetsbedömning samt analys av den långsiktiga säkerheten kommer att pågå mer eller mindre kontinuerligt. Inför ansökan om provdrift ska säkerhetsredovisningen förnyas. Genom att löpande uppdatera modeller (lokala, ämnesvisa modeller och detaljmodeller för tunnelavsnitt, del av deponeringsområde etc) kommer SKB hela tiden att ha underlag för att bedöma om förutsättningarna enligt SR-Site fortfarande är giltiga. Om information från utbyggnaden visar att så inte är fallet, kan planerna för utbyggnaden behöva justeras. Eventuellt kan då också säkerhetsredovisningen behöva förnyas. För övriga fall kommer frågor med bäring på den långsiktiga säkerheten att hanteras inom processen bedömning av anläggningens och verksamhetens säkerhet, se avsnitt 6.5.

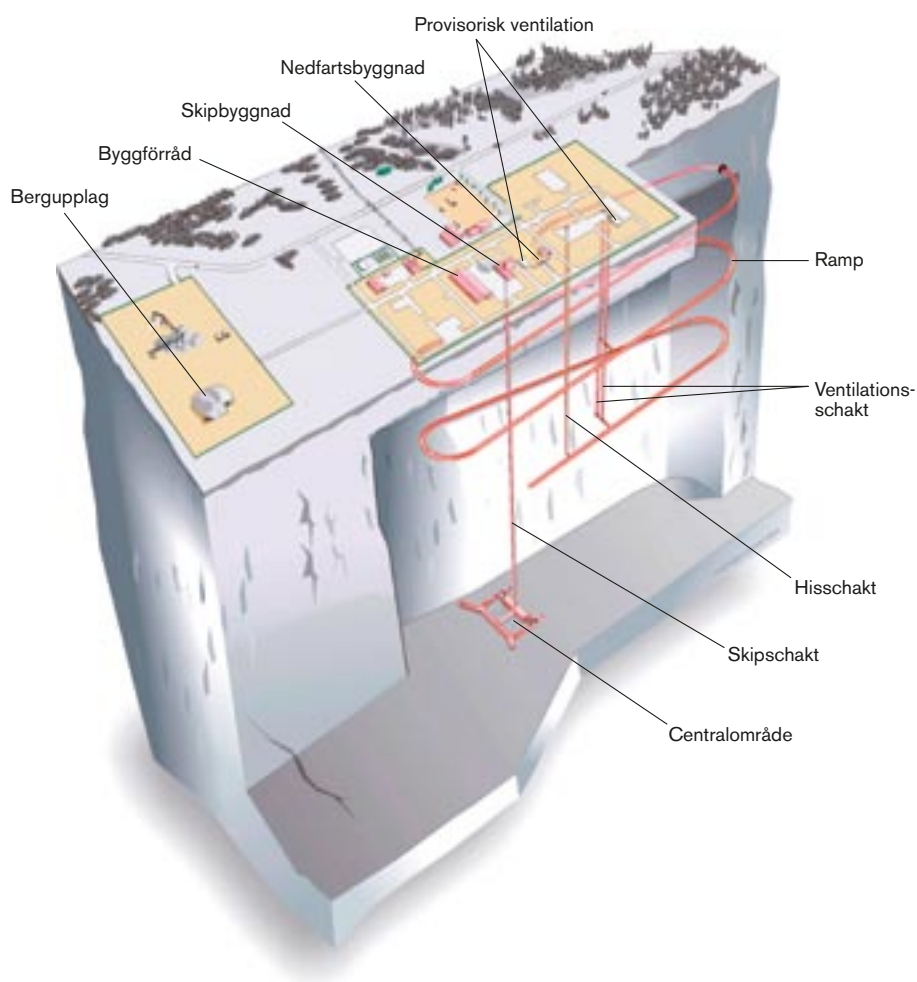


Figur 8-1. Under uppförandeskedet kommer de olika anläggningsdelarna att befinna sig i olika skeden av projektering och bygge. Figuren visar som exempel tillfarter, centralområde och deponeringsområde.

8.2.5 Bergarbeten

Under den första delen av uppförandeskedet utförs huvudsakligen bergarbeten av kontrakterade entreprenörer. Tillfarterna till förvarsnivå är tidskritiska. Utbyggnaden av dessa startar därför så snart förberedelserna på byggplatsen är klara. Figur 8-2 visar hur långt man beräknar ha kommit efter cirka tre år.

När schaktet nått valt förvarsdjup och berglaststationen färdigställts inleds berguttaget på förvarsnivån. Med hänsyn till den information som tillkommit under utbyggnaden av rampen och schakten kan utformningen av centralområdet behöva justeras i förhållande till layout D2. Under den senare delen av utbyggnadsfasen – efter det att det första deponeringsområdets läge preciserats – sker uttaget av berg i deponeringsområdet via transporttunnlarna, som ansluter till centralområdet. Så snart som möjligt ska tekniken för att driva deponeringstunnlar och borra deponeringshål, inklusive verifieringen av kriterier för dessa, testas och finslipas. Så långt möjligt kommer detta att göras i Äspölaboratoriet. Det kommer ändå att behövas en intrimningsfas, där tekniken anpassas till de förhållanden som råder på den valda platsen.



Figur 8-2. Uppförande av skipschakt, ramp, hiss- och ventilationsschakt och del av ovanmarksanläggningen. Om skipschaktet för bergmassor uppförs som ett sänkschakt kommer skipschaktet ned till förvarsnivån först.

8.2.6 Tekniska installationer

Tekniska installationer omfattar ventilation, vatten och avlopp, hissar, elkraft, brandskydd och så vidare. Baserat på ett systemfunktionsprogram kommer i huvudsak traditionell projekteringsmetodik att tillämpas. I takt med att undermarksdelarna färdigställs kommer tillfälliga installationer för vatten, avlopp och ventilation att bytas ut mot permanenta installationer.

8.2.7 Ovanmarksdelen

De första aktiviteterna på plats avser förberedelser för berguttag och etablering av infrastruktur till och inom driftområdet. I förberedelserna ingår att etablera byggområdet inklusive byggprovisorier, områdesskydd, vägar, eventuellt reningsverk och upplag för bergmassor. Vidare behöver ovanmarksdelen hägnas in och försörjningen av el och vatten ordnas. Byggnaderna ovan mark uppförs i den takt de behövs, med hänsyn till sin funktion och uppgift. När bergarbetena i centralområdet slutförts är också huvuddelen av alla byggnaderna ovan mark uppförda. Detsamma gäller anläggningar och infrastruktur för mottagning, lagring och transport av bentonit med mera.

8.3 Teknikbehov

Uppförandeskedet sträcker sig över en lång period. Olika teknikdelar kommer att tas i bruk allt eftersom utbyggnad av förvaret fortskrider, för att mot slutet av skedet övergå i driftsättning av delsystemen. Det planerade utvecklingsläget för de viktiga delsystemen vid byggstart sammanfattas i tabell 7-1 till och med 7-4. Tekniken för att bygga tillfarterna (sänkschakt och ramp) tas då i bruk. Bygget av rampen, sänkschakt och övriga schakt kommer att ge data och erfarenheter om framför allt drivningsteknik, bergförstärkning och tätning som är viktiga att ta tillvara för att anpassa tekniken till de bergarbeten som senare ska göras på förvarsnivån.

Parallellt med tillfarterna byggs också delar av anläggningarna ovan mark, däribland produktionsbyggnaden för att tillverka buffert och återfyllning. Material och metoder för tillverkningen måste därför vara valda på ett tidigt stadium.

Nästa milstolpe, med avseende på teknikbehovet, infaller när tillträde finns till förvarsnivån och bergarbetena där kan inledas. Först byggs centralområdet och närliggande transporttunnlar. Byggtekniken är till stora delar densamma som för rampen, men det finns också skillnader. Centralområdets bergrum, med sina stora dimensioner, kräver mer storskalig teknik för berguttag etc. När de första deponeringstunnlarna drivs och deponeringshål borrar introduceras teknik och utrustning för detta, liksom platsanpassade undersökningsmetoder och acceptanskriterier för deponeringspositioner.

Tillträde till förvarsnivån kan alltså ses som en viktig avstämningpunkt för utvecklingen och implementeringen av en stor del av den teknik som ska användas i slutförvaret. Tabell 8-1 till och med 8-4 sammanfattar den planerade statusen för viktiga metoder och delsystem, i det läge när respektive metod eller delsystem kan introduceras på förvarsnivån. Tabellerna är uppbyggda på samma sätt som motsvarande tabeller i kapitel 5 och kapitel 7.

Tabell 8-1. Teknik för bergarbeten – planerad status när tillträde finns för bergarbeten på försvarsnivån.

Teknik	Planerad status – byggstart på försvarsnivån	Hänvisning till avsnitt i del III
Undersökningar		
Målet för SKB:s insatser inom området är att metodik, metoder och instrument för undersökningar av deponeringsområden och deponeringspositioner är klara att tas i bruk. Häri ingår metodik och metoder för att verifiera acceptanskriterier för deponeringspositionerna.		12.3
Berguttag, förstärkning, tätning		
Målet för SKB:s insatser inom området är att vid Äspölaboratoriet ha trimmat in teknik för berguttag, förstärkning och tätning för alla anläggningsdelar på försvarsnivå (centralområde, transporttunnlar, deponeringstunnlar, deponeringshål). Tekniken ska vidare ha anpassats till erfarenheter från ramp- och schaktdrivning samt information från undersökningar på försvarsnivå.		12.5–12.7

Tabell 8-2. Teknik för buffert – planerad status när tillträde finns på försvarsnivån.

Teknik	Planerad status – tillträde till deponeringstunnel	Hänvisning till avsnitt i del III
Produktion och hantering ovan mark		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Avtal träffade med leverantörer.	–
	Program för kontroll av materialkvaliteter tas fram. Utbyggnad av anläggningar och infrastruktur för mottagning, transport och lagring av material till buffert klar.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Produktionsanläggning under färdigställande.	–
Pressning – block, ringar och pelletter	Produktionsanläggning under färdigställande.	13.3
Mellanlagring – block, ringar och pelletter	Lager och utrustningar under uppförande/tillverkning.	13.4
Hantering och applicering – deponeringshål		
Inredning	Teknik utprovad och under intrimning.	13.5
Installation – block och ringar	Teknik utprovad och under intrimning.	13.6
Förslutning – tillfälligt buffertskydd	Teknik utprovad och under intrimning.	13.5
Installation – pelletter/granuler	Teknik utprovad och under intrimning.	13.7

Tabell 8-3. Teknik för kapselhantering och deponering vid slutförvaret – planerad status när tillträde finns på försvarsnivån.

Teknik	Planerad status vid tillträde till deponeringstunnel	Hänvisning till avsnitt i del III
Målet för SKB:s insatser inom området är att tekniken för kapseltransport, omlastning och deponering så långt möjligt ska vara utprovad och intrimnad när den förs över från Äspölaboratoriet till slutförvaret.		
Hantering av transportbehållare ovan mark och nedtransport i ramp	Transportfordon och övrig utrustning byggd, provad och under intrimning.	14.8
Omlastningsstation och utrustning för att flytta kapslar från transportbehållare till deponeringsmaskin.	Detaljprojektering klar, förberedande arbeten pågår.	14.8
Deponeringsmaskin och övrig utrustning för att installera buffert och deponera kapslar	Maskin och övrig utrustning byggd, utprovad och under intrimning.	13.6, 14.8

Tabell 8-4. Teknik för återfyllning – planerad status när tillträde finns på förvarsnivån.

Teknik	Planerad status – tillträde till deponeringstunnel	Hänvisning till avsnitt i del III
<i>Produktion och hantering ovan mark</i>		
Hanteringskedja från brytning till slutförvar	Avtal träffade med leverantörer. Program för kontroll av materialkvaliteter tas fram. Utbyggnad av anläggningar och infrastruktur för mottagning, transport och lagring av material till återfyllning klar.	–
Behandling och mellanlagring – råmaterial	Produktionsanläggning under färdigställande.	–
Pressning – block till övre del av deponeringshål	Produktionsanläggning under färdigställande.	15.3
Mellanlagring – block, pelletar/ granuler	Lager och utrustningar under uppförande/tillverkning.	15.4
<i>Hantering och applicering – deponeringstunnel</i>		
Borttag av dränage och tillfälligt buffertskydd	Teknik utprovad och under intrimning.	15.5
Återfyllning – övre del av deponeringshål	Teknik utprovad och under intrimning.	15.6
Återfyllning – block i tunnel	Utrustning under tillverkning. Intrimning av tekniken påbörjad. Eventuell prototypinstallation under vattenmättnad.	15.6
Återfyllning – pelletar/granuler i tunnel	Utrustning under tillverkning. Intrimning av tekniken påbörjad.	15.7
Förslutning – temporär plugg i tunnel	Detaljprojektering genomförd, baserad på erfarenheter av förslutning som byggts vid Äspölaboratoriet.	15.8

9 Huvudskede driftsättning

Driftsättningen av slutförvaret inleds när bergarbeten och tekniska installationer på förvarsnivån kommit så långt att detta är möjligt. Vidare är erforderliga maskiner, hanteringsutrustningar samt delar av ovanjordsanläggningarna på plats.

9.1 Milstolpar

Viktiga milstolpar under detta skede är:

- Start samfunktionsprovning.
- Förnyad säkerhetsredovisning.
- Ansökan om provdrift inlämnad.

9.2 Verksamhet

Driftsättningen av slutförvaret innebär att verksamheten övergår från att i första hand omfatta projektering och byggande till att huvudsakligen vara inriktad på deponeringsprocessen, det vill säga deponering av kapslar och successiv utbyggnad. Driftsättningen avslutas med att SKB ges tillstånd för provdrift, vilket markerar övergången till nästa skede.

Driftsättning innebär att alla tekniska system tas i drift och testas, först var för sig och sedan gemensamt, i syfte att trimma in systemen med varandra. Intrimningen avslutas med så kallad samfunktionsprovning av slutförvaret och därefter samfunktionsprovning av hela kärnbränslesystemet, det vill säga inkapslingsanläggningen, transportsystemet och slutförvaret.

En del i samfunktionsprovningen för slutförvaret är att deponera ett antal kapslar utan kärnbränsle. Samfunktionsprovningen omfattar alla moment som ingår i deponeringscykeln, det vill säga berguttag, installation av buffert och kapsel samt återfyllning. Erfarenheter av samfunktionsprovningen ligger till grund för en förnyad driftsäkerhetsredovisning. Ansökan om tillstånd att ta anläggningen i drift lämnas till myndigheterna i senare delen av driftsättningsskedet.

Tester, provningar och demonstration av maskiner och teknik samt utbildning av personal för deponering genomförs så långt möjligt vid Äspölaboratoriet. Viss anpassning av tekniken till platsförhållanden vid slutförvaret kommer ändå att behövas. Det kan exempelvis gälla att finslipa metoder för att undersöka och verifiera deponeringspositioner och drivningsmetoder för deponeringstunnlar.

Parallellt med att anläggningen driftsätts ska driftorganisationen byggas upp, utbildas och tränas för sina uppgifter. De rutiner och instruktioner som ska gälla under driften av slutförvaret börjar nu användas.

Utbyggnaden av deponeringsområdet (inklusive undersökningar, långtidsobservationer, platsmodellering och säkerhetsanalys) fortsätter i princip enligt beskrivningen i kapitel 8. En viktig uppgift under driftsättningen är att platsanpassa och finslipa metodiken för att undersöka, bedöma och godkänna deponeringspositionerna.

9.3 Teknikbehov

När de tekniska systemen driftsätts ska de vara färdiga att tillämpa i full industriell skala. Driftsättningen innebär att system och organisation trimmas in med anpassning till platsförhållanden, först var för sig och sedan som en helhet (samfunktionsprovningen). Successiva resultat och erfarenheter från driftsättningen kommer att avgöra vilka insatser som krävs för att vidareutveckla tekniken på plats. Finslipning och detaljförbättringar förväntas bli det dominerande inslaget, men det går inte att utesluta att mera omfattande förändringar krävs i något avseenden.

10 Huvudskede drift

När driftskedet startar har SKB fått tillstånd för provdrift. Radioaktivt material, det vill säga kapslar med använt kärnbränsle, anländer för första gången till slutförvaret. Vidare har SKB:s driftorganisation övertagit ansvaret för anläggningen.

10.1 Milstolpar

En viktig milstolpe under detta skede är övergången från provdrift till rutinmässig drift. Den rutinmässiga driften kommer sedan att pågå under många år. Uppdateringar av teknik och verksamhet kan förväntas under denna period, men det är inte möjligt att i dag förutsäga vad dessa kommer att innebära och när de kan inträffa.

10.2 Verksamhet

10.2.1 Provdraft

Under provdriften ska deponerings- och utbyggnadscyklerna fintrimmas och erforderlig drift-dokumentation uppdateras. När SKB kan visa att driften rutinmässigt kan genomföras på planerat sätt och med önskad kapacitet inlämnas en ansökan om rutinmässig drift.

Slutförvaret dimensioneras för 200 kapslar per år, vilket ska jämföras med det långsiktiga deponeringsbehovet som förväntas vara 150–160 kapslar per år. Under provdriften ökas kapaciteten successivt från inledningsvis 25–50 kapslar per år.

Med undantag av att kapaciteten är lägre, särskilt i början, är verksamheten under provdrift densamma som under rutinmässig drift.

10.2.2 Rutinmässig drift

Den rutinmässiga driften definieras som den driftverksamhet som sker efter det att SKI har lämnat tillstånd för rutinmässig drift av KBS-3-systemet, till dess att allt använt kärnbränsle från det svenska kärnkraftsprogrammet har deponerats i slutförvaret. Under detta skede omfattar verksamheten vid slutförvaret tillverkning av buffert och återfyllningsmaterial, stegvis utbyggnad av anläggningen, deponering av kapslar och återfyllnad samt drift och underhåll av slutförvarets tekniska system.

Genom att tillämpa specificerade metoder och rutiner säkerställs att viktiga krav på verksamheterna under drift uppnås. Bland annat måste:

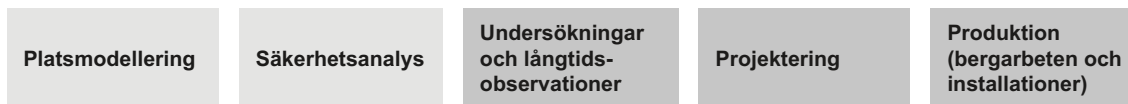
- samtidig utbyggnad och drift kunna genomföras säkert, effektivt och miljöanpassat,
- ett gott strålskydd upprätthållas,
- missöden förhindras och deras konsekvenser mildras.

Verksamheten under drift har delats in i tre huvudprocesser:

- Tillverkning av buffert och återfyllningsmassor.
- Deponering
- Drift och underhåll av tekniska system.

Deponeringsprocessen har fyra ingående delprocesser. Den första, berguttag, sker under en så kallad utbyggnadscykel för ett antal deponeringstunnlar. De tre därpå följande delprocesserna – deponering av kapslar, återfyllning samt förslutning av deponeringstunnel – sker under en deponeringscykel. Schematiskt åskådliggörs detta i figur 10-1.

Utbyggnadscykel



Deponeringscykel



Figur 10-1. Under driftskedet indelas verksamheten i en utbyggnadscykel och en deponeringscykel. Utbyggnad och deponering pågår parallellt i skilda delar av förvaret.

Den rutinmässiga driften kan indelas i ett antal etapper, där varje etapp omfattar en deponerings- och en utbyggnadscykel. En deponeringscykel omfattar deponering av ett antal kapslar samt återfyllning och förslutning av deponeringstunnlar.

En utbyggnadscykel omfattar utbyggnad av de deponeringstunnlar och övriga tunnlar, samt eventuellt även schakt för ventilation, som krävs för att genomföra nästa deponeringscykel. I utbyggnadscykeln ingår att ta ut tunnlar och eventuellt schakt, att rengöra deponeringstunnlarna samt att utföra de installationer och bygga de konstruktioner som behövs för att genomföra deponering, återfyllning och förslutning av deponeringstunnel. Utbyggnadscykeln inkluderar även undersökningar, långtidsobservationer, platsmodellering och säkerhetsbedömning samt säkerhetsanalys – långsiktig säkerhet, i princip enligt beskrivningen i kapitel 8.

Motivet för indelningen i deponerings- och utbyggnadscykler är att omlastning och deponering av kapslar med använt kärnbränsle ska kunna ske skilt från bergarbeten och övrig verksamhet. Under en deponerings- och utbyggnadscykel ska deponering, återfyllning och förslutning kunna pågå parallellt inom en avgränsad del av ett deponeringsområde. Samtidigt ska tunnlar och deponeringshål kunna byggas i en annan del av deponeringsområdet. För att möjliggöra detta utformas anläggningen så att de delar där utbyggnad sker kan stängas av från övriga delar och verksamheter, se figur 10-2.

Deponerings- och utbyggnadscyklerna genomförs i perioder som varierar, från ett upp till fem år. En ny deponeringscykel inleds då deponeringstunnlar och deponeringshål för de kapslar som ska deponeras under cykelns byggts, rengjorts och godkänts och de installationer och konstruktioner som behövs för deponering och återfyllning är på plats. Deponeringscykeln avslutas då samtliga deponeringstunnlar som ingår i deponeringscykeln förslutits med godkända betongpluggar. Cyklernas omfattning anpassas så att utbyggnaden av slutförvaret kan genomföras på ett effektivt sätt.

Berguttag

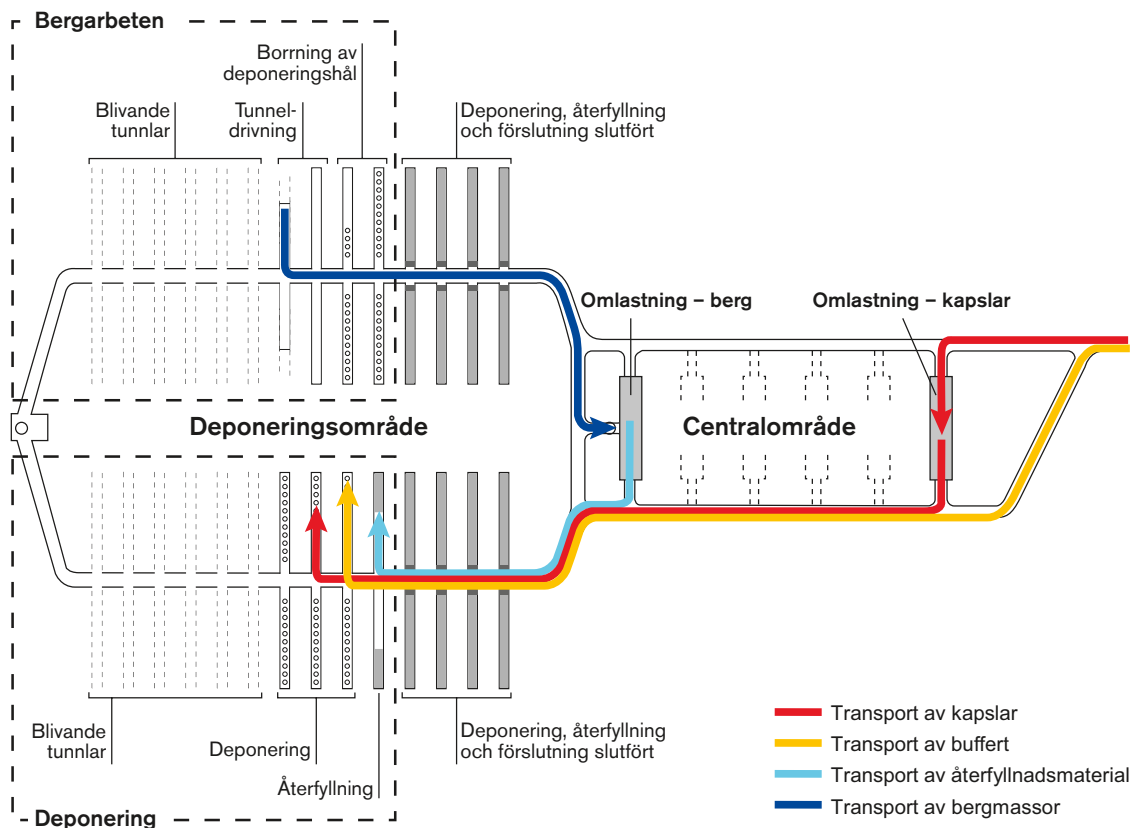
Berguttaget avser alla aktiviteter som krävs för att bygga deponeringstunnlar från stamtunnlar, inklusive förberedelser och borrning av deponeringshål. I aktiviteten ingår även att förse deponeringstunneln med körbana (alternativt linsågad botten) och provisoriska installationer för ventilation och el.

Arbetet planeras ske av SKB i egen regi och med i huvudsak standardiserad utrustning. Ett undantag är utrustningen för att borra deponeringshål. För detta arbetsmoment utvecklar SKB ny utrustning baserad på erfarenheter från den utrustning som använts vid Äspölaboratoriet.

När berguttaget avslutas ska tunneln vara rengjord och förberedd med installationer för överlämning till deponeringscykeln.

Deponering

Delprocessen deponering av kapslar avser de aktiviteter som utförs för att installera buffert och kapslar i deponeringshålen samt för att fylla igen eventuella, icke godkända deponeringshål med krossat berg. Deponeringen utförs med ett specialfordon som hämtar kapsel och buffert i centralområdets omlastningsstation och sedan transporterar komponenterna till deponeringstunneln.



Figur 10-2. Separering av deponering och bergarbeten.

Återfyllning av deponeringstunnel

Återfyllningen sker när alla deponeringshål i en deponeringstunnel har fyllts med kapslar och buffert. Huvuddelen av återfyllningen består enligt gällande referensutförande av pressade block, resterande volym längs med tunnelkonturen, består av pelletter.

Förslutning av deponeringstunnel

Delprocessen förslutning av deponeringstunnel inleds när återfyllningen är avslutad. Förslutningen består av en platsgjuten betongplugg som ska säkerställa att tunneln försluts mekaniskt och hydrauliskt. Svälltrycket som byggs upp i återfyllningen får alltså inte leda till att material förskjuts mot den öppna transporttunneln eller till att vatten läcker ut från deponeringstunneln.

10.2.3 Transport och mottagningskontroll

Under driften av slutförvaret kommer följande transporter att ske:

- Transportbehållare med kapslar transporteras från driftområdet ovan mark till centralområdet med specialfordon som går i rampen.
- Bergmassor transporteras från brytningsfronterna till grovkrossen i centralområdet och vidare via skip till ovanmarksdelen och bergupplaget.
- Återfyllningsmaterial och buffert transporteras via schakt från produktionsbygganden ner till centralområdet och vidare ut till deponeringsområdet.
- Övrigt bygg- och driftmaterial, till exempel betong, transporteras ner – huvudsakligen via rampen.
- Person- och servicetransporter.

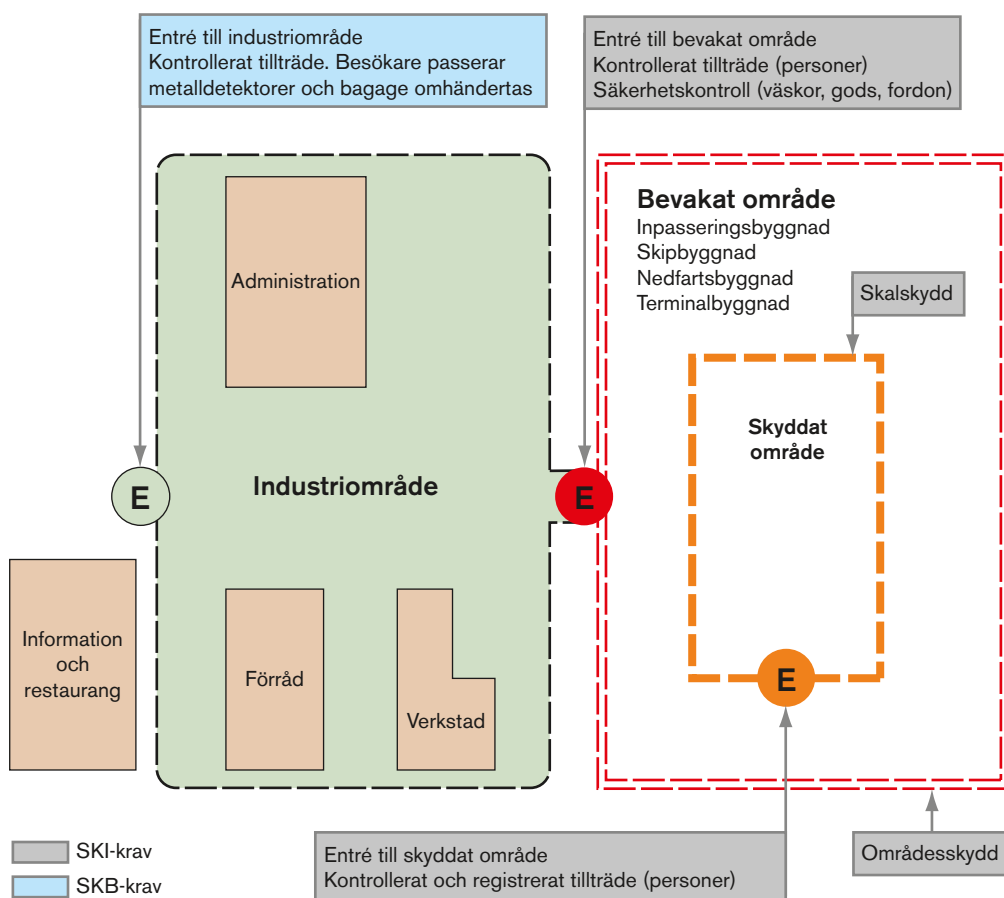
Allt material som kommer till slutförvarets driftområde ska kontrolleras i syfte att uppfylla SKB:s egen mottagningskontroll och kraven enligt SKIFS 2005:1.

10.2.4 Fysiskt skydd

SKB ska upprätta en plan för fysiskt skydd för att uppfylla kraven i SKI:s föreskrifter och gällande lagar och förordningar, men också för att skydda anställda, entreprenörer och besökare samt anläggningar mot skada. Planen ska omfatta såväl organisatoriska som administrativa och tekniska åtgärder. Exempel på åtgärder är att särskilda rutiner och regler kommer att gälla för tillträde för alla kategorier (anställda, konsulter, entreprenörer, leverantörer, tillfälliga besökare). Vidare kommer alla som arbetar vid slutförvaret att få utbildning i säkerhetsskydd. Området i och kring slutförvaret kommer att delas in i tre zoner med olika skydds krav: industriområde, bevaktat område respektive skyddat område, se figur 10-3.

10.2.5 Tillverkning av buffert och återfyllnad

I driftprocessen ingår tillverkning av buffert och återfyllning. Tillverkningen sker i driftbyggnaden, dit insatsmaterialen levereras. Stora krav kommer att ställas på utförande och kontroll av processen för att tillverka och installera buffert och återfyllning. Bufferten utgör en av slutförvarets barriärer. Den ska hindra vattenflöde och skydda kapseln. Om det skulle finnas otäta kapslar ska bufferten hindra och fördröja transporten av radionuklider från kapseln till berget. Syftet med återfyllningen av deponeringstunnlar och övriga berggrum är att bergets barriärfunktioner ska bibehållas. Återfyllningen är dock ingen barriär i sig.



Figur 10-3. Principbild som visar hur anläggningarna inom slutförvarets driftområde kan indelas med avseende på skyddsklass.

10.2.6 Drift och underhåll av tekniska system

En förutsättning för att deponering ska kunna genomföras i slutförvaret är att anläggningen – både ovan och under mark – drivs, underhålls och utvecklas i takt med att undermarksdelen utvidgas. Det faktum att anläggningens driftperiod är lång medför att de tekniska systemen på sikt måste ersättas. Dessa insatser styrs av huvudprocessen för drift och underhåll av tekniska system. Verksamheten i denna process kommer att optimeras för att driften och underhållet ska bli så effektiv som möjligt.

Underhåll av slutförvarets byggnader, fordon, maskiner och system förväntas bli en betydande del av verksamheten. Underhåll kommer enligt planerna att utföras på följande objekt i anläggningen:

- Byggnader och markytor.
- Bergrum.
- Specialfordon för bentonitblock, transportbehållare etc.
- Standardfordon såsom hjullastare, lastbilar, dumprar.
- Maskiner – deponeringsmaskin för kapslar, press för bentonit, bergkross, bormaskin för deponeringshål, inläggningsmaskin för återfyllnad etc.
- Transportanordningar – transportörer, traverser, telfrar och hissar.
- Bergmaskiner – bormaskiner, injekteringsutrustning, lastmaskiner, grävmaskiner, dumprar etc.
- Installationer för till exempel elkraft, belysning, ventilation, bergdränage, släckvatten.

Underhållsaktiviteterna kan delas in i tre typer:

- Tillståndsbaserat underhåll.
- Förebyggande underhåll.
- Underhåll baserat på inspektioner.

Dessa tre typer av underhåll planeras och styrs via ett underhållsschema som är integrerat i det system som övervakar den dagliga driften av slutförvarsanläggningen.

Vissa av driftområdets byggnader är direkt knutna till driften medan andra är avsedda för service och administrativa syften, till exempel information. Utöver driftområdet finns externa anläggningar såsom berggupplag, ventilationsstationer och bentonitförråd. För att verksamheten ska fungera behövs även vägar, vattenförsörjning, elkraft, tele- och datakommunikation med mera.

Del III

Teknikutveckling inom kärnbränsleprogrammet

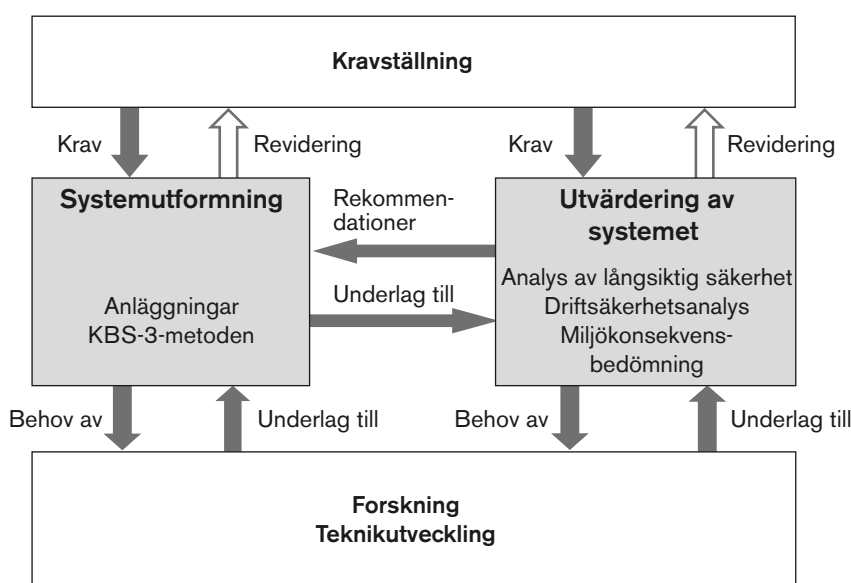
- 11 Översikt – teknikutveckling
- 12 Berglinjen
- 13 Buffertlinjen
- 14 Kapsellinjen
- 15 Återfyllningslinjen
- 16 Förslutningslinjen
- 17 Återtag
- 18 Alternativ förvarsutformning – KBS-3H

11 Översikt – teknikutveckling

Parallellt med arbetet att utforma slutförvaret bedriver SKB teknikutveckling för att kunna bygga, driva och försluta slutförvaret så att kraven på långsiktig säkerhet, låg stråldos vid arbete i anläggningen samt god yttre miljö på den plats verksamheten sker uppfylls. Teknikutveckling innebär att vi utvecklar metoder och system – i form av till exempel maskiner och utrustningar – som vi sedan stegvis tillverkar, provar och vidareutvecklar.

KBS-3-systemet utformas för att uppfylla, och utvärderas mot, ställda krav. Teknikutveckling och forskning krävs för att anläggningen ska kunna byggas och utvärderas. Teknikutvecklingens roll är att bidra till en säker slutförvarsmetod. Figur 11-1 visar teknikutvecklingens roll. Figuren är principiell och visar en flödesprincip, som har sin utgångspunkt i en teknisk beskrivning av deponeringsmetoden. Med referensutformning menar vi den aktuella utformningen av KBS-3-systemet och dess delar. Referensutformningen uppdateras stegvis allt eftersom resultaten från forskning, teknikutveckling och säkerhetsanalys blir tillgängliga. Såväl teknikutveckling vid projekteringen av slutförvaret som platsdata och information ligger till grund för referensutformningen. Detta resultat, kompletterat med information om maskiner och deras funktion, analyseras med avseende på radiologisk säkerhet under drift. Återkopplingar till teknikutveckling och projektering sker till dess vi kan visa hur en säker drift ska ske vid givna förutsättningar. Därefter följer en analys av den radiologiska säkerheten på lång sikt. Den senaste analysen (SR-Can) av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark och Laxemar rapporterades under 2006 /11-1/. Även det arbetet kräver återkopplingar. Eftersom hela cykeln tar flera år att löpa igenom hinner förbättringar komma fram under tiden. Dessa introduceras i praktiken vid iteration mellan stegen, och hålls inte alltid tillbaka till dess en flödescykel har genomlöpts. Såsom figuren illustrerar svarar teknikutveckling för information till framför allt avnämarna: projektering, analys av driftsäkerhet och analys av långsiktig säkerhet. Informationen som ligger till grund för analysen av den långsiktiga säkerheten rör i första hand teknikens möjligheter att leva upp till beskrivningen (med avvikelser) av initialtillståndet hos slutförvarets delar, se kapitel 23–26 i del IV.

Efter många års forskning och ett flertal genomarbetade cykler har de stora dragen i teknikvalen kunnat göras och prövas. Det arbete som återstår berör maskiner, metoder och annan utrustning som behövs för att uppföra och försluta slutförvaret, men som inte finns på den kommersiella marknaden eller i en kommersiell tillämpning. Frågor som behandlas inom verksamhetsområdet teknikutveckling kännetecknas också av att det inte är uppenbart hur SKB ska använda tekniken, vilka risker för



Figur 11-1. Teknikutvecklingens roll i cykeln för planering, byggande och drift av slutförvaret.

misstag som finns eller vilka konsekvenser olika fel kan leda till. Teknikutvecklingen handlar således om frågor där ytterligare information behövs om funktionen och kapaciteten hos olika komponenter, innan säkra bedömningar av tillämpningen i slutförvaret kan göras.

Det återstående arbetet handlar om att på mer detaljerad nivå komma fram till vilket som är det bästa valet för olika tekniska lösningar. Vi ska också verifiera att givna prognoser och gjorda antaganden kan uppnås i slutförvaret. SKB:s planer för teknikutveckling sträcker sig naturligtvis fram till och med den tidpunkt då förvaret förslutits, det vill säga längre in i framtiden än den tidsrymd Fud-program 2007 täcker. Hela verksamheten redovisas i SKB:s handlingsplan i del I, där alla viktiga milstolpar pekas ut. Med utgångspunkt från milstolparna har teknikbehovet (se avsnitt 5.3, 7.3, 8.3 och 9.3 i del II) kunnat specificeras inför de för teknikutvecklingen tre viktigaste tidpunkterna:

- Ansökan för slutförvaret enligt kärntekniklagen och för slutförvarssystemet enligt miljöbalken.
- Byggstart.
- Start provdrift.

Systemdelarna i slutförvaret, som kapsel, bentonitbuffert, återfyllning etc, ska uppfylla speciella uppgifter som preciseras i SKB:s kravdatabas, se avsnitt 2.4 i del I. Egenskaperna hos delarna bestäms av de konstruktionsförutsättningar och specifikationer som tas fram men också av de produktions- och kontrollmetoder som används och av eventuell påverkan under deponering och transporter. För att åskådliggöra detta används begreppet produktionslinjer, som är en beskrivning av produktionsflödet för de olika systemdelarna. Syftet med produktionslinjerna är att skapa överskådlighet i den allt mer omfattande dokumentationen och SKB har valt att definiera sex produktionslinjer:

- Berglinjen.
- Bränslelinjen (inkluderas i Kapsellinjen i denna del).
- Kapsellinjen.
- Buffertlinjen.
- Återfyllningslinjen.
- Förslutningslinjen.

Ovanstående indelning utgör också grunden för att beskriva teknikutvecklingen i denna del av Fud-programmet. I figur 11-2 ges en översiktlig beskrivning av de aktiviteter som ingår i de olika produktionslinjerna. Aktiviteterna beskrivs även mer ingående i kapitel 12–16. Bränslelinjen innehåller endast momenten resteffektbestämning och torkning. Av praktiska skäl inkluderas därför Bränslelinjen i Kapsellinjen i detta Fud-program.

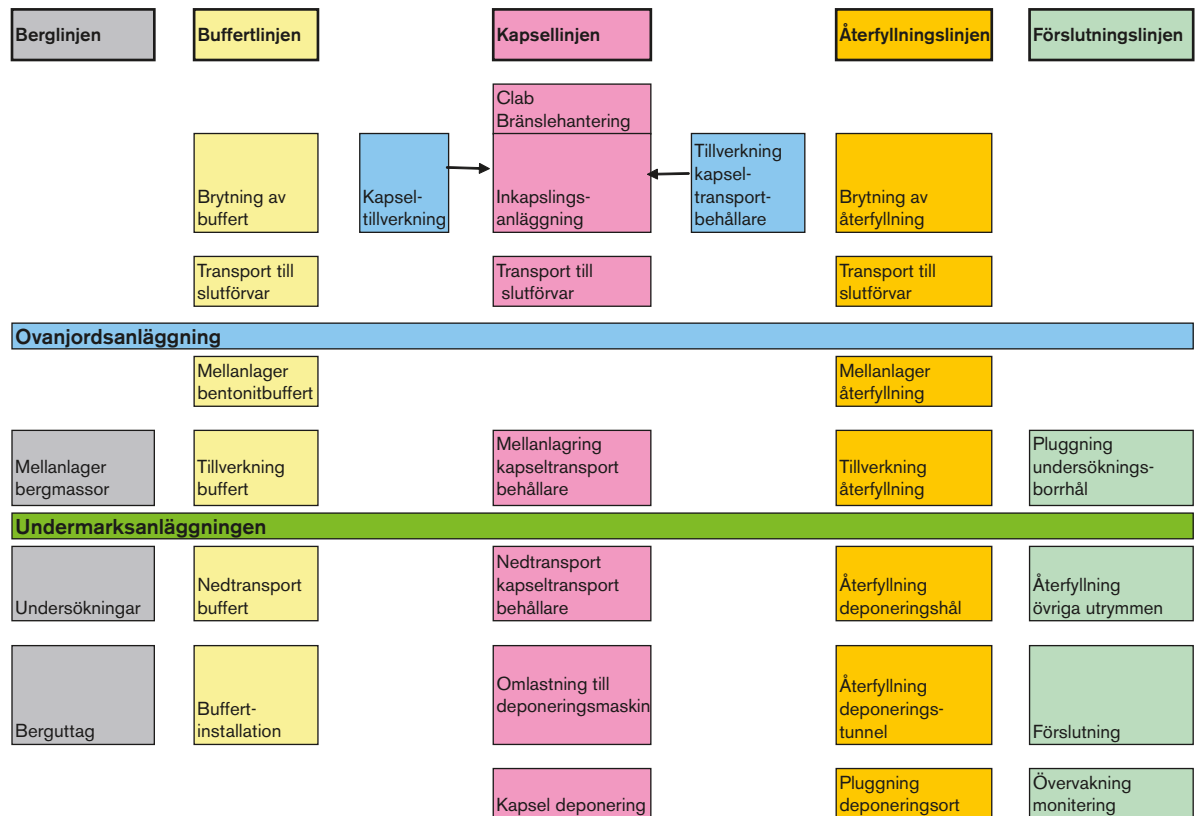
I kapitel 17 presenteras också våra kunskaper och slutsatser om teknik för att återta deponerade kapslar, där bentonitbufferten hunnit svälla och låsa fast kapseln i deponeringshålet.

Den teknikutveckling som beskrivs i de olika produktionslinjerna gäller ett KBS-3-förvar där kapslarna deponeras vertikalt (KBS-3V). SKB undersöker också möjligheten att deponera kapslarna horisontellt (KBS-3H), se kapitel 18.

11.1 Berglinjen

Berglinjen omfattar tillredning och utbyggnad av deponeringsområdet och övriga utrymmen i slutförvarsanläggningen under jord. I Sverige finns lång erfarenhet av att bygga i berg och världsledande teknik har utvecklats inom svenskt bergsbruk. Den kunskapen kommer vi att kunna använda när vi karakteriserar berget, borrar, spränger, skrotar och bergförstärker. Dock kommer stor precision att behövas vid arbetet för att uppfylla de krav som ställs på slutförvaret.

Ett välkänt fenomen är att det vid berguttag bildas en mer eller mindre störd zon runt tunnlar och bergrum. Hur stor den störda zonen blir beror bland annat på vilken metod som används och förhållandena i berget. Zonens hydrauliska egenskaper kan, om störningen är alltför stor, påverka förvarets funktion på sikt. Kunskap finns i dag om hur vi ska kunna begränsa zonens utsträckning.



Figur 11-2. Produktionslinjerna.

Däremot saknar vi tillräcklig kunskap om hur de hydrauliska egenskaperna ändras om graden av störning förändras. Vi bedömer dock att den störda zonens betydelse kan byggas bort med försiktig och kontrollerad teknik för borrhning och sprängning.

Sulan, det vill säga botten i deponeringstunneln, behöver göras plan för att förenkla för deponeringsmaskinen att ta sig fram och för återfyllningsmaskinen att bygga raka staplar av blocken med återfyllningsmaterial. Ett alternativ till att försiktigt borra och spränga en jämn sula är att linsåga ut den understa skivan. Linsågning i berg används i olika sammanhang, men behöver demonstreras specifikt för det här ändamålet i en deponeringstunnel innan metoden kan sägas vara tillgänglig för slutförvarsanläggningen.

Borrhning av deponeringshål har vi visat fungerar bra vid försök i full skala i Äspölaboratoriet. Ännu återstår dock att visa att metoden också kan nå upp till den kapacitet som krävs i slutförvaret.

Problemet med vatteninflöde till undermarksanläggningen kommer bara delvis att kunna lösas med hjälp av befintlig tätningsteknik. Svårigheten är att vattentrycket är högt på det stora djup som slutförvaret ligger på. Även små sprickor är vattenförande. Detta faktum innebär att vi måste kunna injektera också de små sprickorna. Dessutom krävs att injekteringsmaterial inte ger högre pH än 11 i grundvattnet när det lakas ut, se figur 20-2 i del IV. Är pH högre kan den långsiktiga säkerheten hotas. Vi måste således ta fram injekteringsmaterial som kan användas i små sprickor och som dessutom har lågt pH.

Vid den första viktiga milstolpen – ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken – ska SKB ha en referensmetod för borrhning och sprängning av deponeringstunnlar. Vi ska också ha fastställt acceptanskriterier för deponeringstunnelns konturer i samarbete med återfyllningslinjen och visat att vi kan hålla oss inom dessa. Hanteringen och användningen av sprängämnen ska vara säker och ändamålsenlig. Det ska finnas utprovade metoder och material för att täta sprickor av de storlekar som förväntas i slutförvaret. Tätningmaterialen ska ha lågt pH (< 11). SKB tänker använda silica sol för att täta de finaste sprickorna. De material som ska användas för bergförstärkning och andra

konstruktioner ska också vara utprovade och uppfylla kraven på lågt pH. En metod för att borra deponeringshål ska ha valts och vi ska ha gjort en preliminär konstruktion av den maskin som vi planerar att använda.

Inför byggstarten ska SKB ha visat att maskiner och personal kan tillämpa den metodik för försiktig sprängning som vi avser att använda för bygge av ramp och schakt. Vi ska också ha visat att injekteringen fungerar vid upprepade salvor och att vi kan täta de stora vattenförande zoner vi förväntar oss att passera vid utbyggnaden av förvaret. Inför starten av bergarbetena i deponeringsområdet ska vi ha påbörjat en generalrepetition med maskiner och personal för att driva deponeringstunnlar. Vi ska även ha tillverkat och driftsatt en maskin för att borra deponeringshål.

11.2 Buffertlinjen

Buffertlinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av den buffert – i form av ringar, block och pelletar eller granuler av högkompakterad bentonit – som omger kapseln i deponeringshålet.

Bentonittillgångarna i världen är mycket stora. Flera av de aktörer, som finns på marknaden, kan leverera en produkt som uppfyller SKB:s krav på materialet. Teknik och metoder för att behandla bentoniten innan den kan pressas till block, till exempel krossning, siktning, malning, torkning etc, är kända och beprövade. SKB har provat två metoder för att pressa blocken och ringarna till bufferten: enaxlig pressning och isostatisk pressning. Båda teknikerna kommer att vidareutvecklas innan någon av dem kommer till användning i slutförvarsanläggningen. Teknik för att pressa pelletar finns i kommersiell skala, men måste anpassas för att möta de behov som finns i slutförvaret.

Inför ansökan ska frågan om hur buffertmaterialet ska skyddas från vatten i berget vara löst – med bibehållna goda egenskaper till dess att deponeringstunneln återfylls. Det temporära buffertskyddet ska ha testats under realistiska förhållanden. Då ska också en referensmetod för att tillverka block och ringar ha valts. Vi måste också veta under vilka förhållanden de tillverkade blocken och ringarna kan lagras, så att de inte torkar ut eller börjar svälla. En prototyp till lyftverktyg, för att deponera bentoniten, kommer att vara i drift och en prototyp till buffertnedläggningsmaskin är under konstruktion.

Inför byggstarten för slutförvaret kommer SKB att ha detaljprojekterat anläggningen där blocken och ringarna ska tillverkas, så att den går att börja bygga.

11.3 Kapsellinjen

Kapsellinjen beskriver hur kapseln tillverkas, försluts, transporteras och deponeras samt hur den kvalitetssäkras i de olika skedena. Kvalitetssäkringen av kapslarna syftar till att visa att kapslarna uppfyller de uppställda specifikationerna. Därigenom säkerställs såväl hanteringsmässig som långsiktig säkerhet. Kvalitetssäkringen sker både genom styrning av processer samt genom olika kontroller.

Utvecklingen av metoder för tillverkning, kontroll och förslutning av kapslarna har pågått under många år. Arbetet innebär att utveckla kvalitetssäkra industriella processer hos olika leverantörer. När det gäller svetsprocessen som används vid förslutning av kopparkapseln har SKB valt att utveckla denna i egen regi.

Av stor vikt är att kunna verifiera kapselns egenskaper vilket sker med olika standardiserade metoder som kemiska analyser av materialsammansättning, strukturundersökningar, kontroll av dimensioner och bestämningar av hållfasthetsegenskaper. Dessa tekniker kan dock endast göras punktvis och på delar av kapseln som ändå skulle bearbetas bort. Heltäckande provning måste ske med oförstörande metoder som ultraljudprovning och radiografering. SKB har valt att i egen regi utveckla och anpassa dessa metoder.

I inkapslingsanläggningen planerar SKB att använda beräknade värden på resteffekt som underlag för urvalet av bränsleelement till kapslarna. Om det behövs ska resteffekten kunna verifieras med hjälp av gammamätningar. I inkapslingsanläggningen ska det använda kärnbränslet också torkas innan det kan placeras i kapseln. SKB har i ansökan om att uppföra inkapslingsanläggningen visat på att vakuumtorkning är en metod för torkning av bränslet. I planeringen för kommande år ingår en studie av alternativa torkningsmetoder i syfte att effektivisera torkprocessen, främst avseende läckande bränsle.

För att transportera kapslarna från inkapslingsanläggningen till slutförvarsanläggningen behövs en specialutformad transportbehållare. Den – liksom alla andra transportbehållare som SKB använder – utformas för att uppfylla reglerna i IAEA:s transportrekommendationer. SKB anlitar etablerade behållarkonstruktörer för att utforma och tillverka behållarna.

En förutsättning för att SKB ska få drifttillstånd för de framtida inkapslings- och slutförvarsanläggningarna är att leverantörer, system och processer för att tillverka och försluta kapslarna uppfyller alla ställda krav. En del av detta arbete sker inom ramen för SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslarna /11-2/, se också avsnitt 2.4 i del I. Programmet omfattar också kvalificering av den oförstörande provningen. Inför ansökan kommer SKB att presentera sin strategi för kvalificeringarna. Då kommer också tillförlitlighetsanalyser av kapselns komponenter att finnas framme. När det gäller transporter, hantering och deponering av kapslar så ska den preliminära konstruktionen (basic design) av transportfordon och annan utrustning vara framtagen. Den deponeringsmaskin som finns i Äspölaboratoriet ska vara ombyggd så att den går på hjul i stället för på räls.

Inför provdriften kommer SKB att ha testat hela hanteringskedjan av kapseln från inkapslingsanläggningen till deponering i slutförvarsanläggningen.

11.4 Återfyllningslinjen

Återfyllningslinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av återfyllningsmaterial i deponeringstunnlar samt installation av temporära pluggar i tunnarnas mynningar.

SKB har utrett flera sätt för att återfylla deponeringstunnlar; bland annat en blandning av krossat berg och bentonit som kompakteras i tunneln, förkompakterade block av antingen svällande lera eller en blandning av krossat berg och bentonit. I säkerhetsanalysen SR-Can /11-1/ analyserades de två tillvägagångssätt som bygger på förkompakterade block. Resultaten av den analysen visade att båda alternativen uppfyller kraven, men att block av svällande lera hade större marginal till de funktionsindikatorer som användes i analysen. Den fortsatta teknikutvecklingen inriktas nu på att utveckla metoder och utrustning för konceptet med block av naturlig svällande lera.

Teknik och metoder för att bereda leran inför pressningen till block är kända och beprövade. Blocken kan pressas med enaxlig pressning, enligt den teknik som till exempel tillämpas i industrin för att producera eldfast tegel. Hela tunneln kan inte fyllas med block, utan spalten mellan staplarna av block och bergvägg kommer att fyllas med pelletar eller granuler.

Den temporära pluggen i tunnelns mynning kan utformas enligt olika principer. SKB utreder två utformningar; en armerad plugg som förankras i en slits i berget och en friktionsplugg.

Inför ansökan ska referensutformningar för återfyllningskoncept och pluggar vara valda. För återfyllningen innebär detta att koncept och material i återfyllningen ska ha valts och att den utrustning som behövs för installationen ska finnas i prototyputförande. För att frågan, om var gränsen går för det högsta tillåtna inflödet av vatten till deponeringstunneln som kan hanteras vid installationen, ska anses vara löst måste det valda konceptet ha testats i Bentonitlaboratoriet vid olika vatteninflöden till en tunnel.

Inför byggstarten av slutförvaret kommer de då valda referensmetoderna för återfyllning och pluggning att behöva vara installerade i en försöksupställning i Äspölaboratoriet.

11.5 Förslutningslinjen

Förslutningslinjen omfattar återfyllning och pluggning av alla andra utrymmen än deponerings-tunnlarna – såsom stamtunnlar, transporttunnlar, centralområde samt ramp och schakt för transport och ventilation. Dessutom ingår förslutning av undersökningsborrhål från ytan och från slutförvarsanläggningens utrymmen.

Förslutningen av slutförvarets övriga utrymmen kommer inte att ske förrän allt använt kärnbränsle har deponerats. Det innebär att förslutningsaktiviteterna ligger ganska långt in i framtiden. Hittills har SKB prioriterat arbetet med återfyllningen av deponeringstunnlarna. Erfarenheterna från dessa studier kommer att användas inom det fortsatta arbetet med att återfylla även övriga utrymmen. De material som kan bli aktuella är svällande lera, icke svällande lera, bergkross eller kombinationer av nämnda material. Hantering, tillverkning och återfyllning kan i stor utsträckning göras med samma metoder som utvecklas för återfyllningslinjen.

Undersökningsborrhål från markytan och i själva slutförvaret måste tätas senast i samband med förslutningen av slutförvaret. SKB har studerat och utvecklat flera koncept för detta. Det mest lovande konceptet, bentonit i kombination med kvartsbaserad betong, har testats tillsammans med Posiva i ett 500 meter djupt borrhål i Olkiluoto i Finland. Den kvartsbaserade betongen placeras i zoner med dåligt berg.

Inför ansökan ska referensutformningar för att försluta olika delar av slutförvaret vara valda. För förslutningen innebär detta att både material och metod för inplacering av återfyllning och pluggar ska vara valda. Det är också viktigt att vi utreder var gränsen för vatteninflödet in till tunnel går för att kraven på förslutning ska uppfyllas och hur förslutningen i ramp och schakt ska utformas för att funktionen ska bibehållas även efter nästa istid.

Inför byggstarten av slutförvaret bör de material som ska användas i schaktens och rampens övre delar vara testade för de förhållanden som råder under permafrost.

11.6 Återtag

Slutförvaret för använt kärnbränsle ska utformas på ett sådant sätt att det inte behöver övervakas. Om framtida generationer skulle vilja ta upp bränslet igen ska detta vara tekniskt möjligt, även om det i Sverige inte finns något formellt krav på att det ska vara möjligt att återta en deponerad kapsel.

Hur återtaget kan ske beror på när beslutet fattas. Innan bufferten svällt och låst fast kapseln kan kapseln dras upp med hjälp av deponeringsmaskinen så snart kapsellocket frilagts. När bufferten svällt måste kapseln friläggas längs hela sin längd innan den kan lyftas upp. SKB har studerat och utvärderat olika metoder för att frilägga kapslarna från bentonitbufferten. Vi har valt en hydrodynamisk metod som referensmetod, där bentoniten slammas upp med salt vatten och pumpas bort. Metoden har provats och demonstrerats i Äspölaboratoriet, dels vid det så kallade uppslammningsförsöket (som föregick Återtagsförsöket) och dels vid brytningen av Återtagsförsöket. Metoden kan vara tidskrävande, men inga tekniska svårigheter har identifierats.

Vi bedömer därför att vi visat att återtag inom ramen för provdriften är möjligt och att vi kan bygga en utrustning som kan frilägga kapslar ur en svälld buffert. Skulle kapslarna behöva återtas finns tid för att bygga utrustningen och även demonstrera den, innan själva återtaget sker. Inga ytterligare utvecklingsinsatser planeras därför på detta område inom de kommande sex åren.

11.7 Alternativ förvarsutformning – KBS-3H

KBS-3-metoden gör det möjligt att deponera kapslarna vertikalt (KBS-3V) eller horisontellt (KBS-3H). I båda alternativen omges kapseln av en buffert av bentonit. I KBS-3H behövs inga deponeringstunnlar, utan de långa horisontella deponeringshålen borraras direkt från stamtunneln. Detta innebär att en betydlig mindre bergvolym behöver tas ut. Den del av slutförvarsanläggningen som ligger ovan mark påverkas inte av om kapslarna deponeras horisontellt eller vertikalt.

SKB och Posiva samarbetar sedan 2002 för att genomföra det forskningsprogram för KBS-3H som SKB publicerade 2001. Programmet omfattar utformning av förvarets komponenter och en generell förvarslayout. En demonstration av deponeringstekniken i full skala genomförs i Äspölaboratoriet. Inför denna har den utrustning som behövs utformats och tillverkats. Programmet för KBS-3H omfattar inte bara teknikutvecklingsfrågor utan också en säkerhetsanalys och därtill hörande frågor för ett tänkt förvar i Olkiluoto.

I slutet av 2007 avslutas programmet och resultaten från de olika aktiviteterna ska rapporteras. Genomförbarhet och långsiktig säkerhet ska utvärderas. Baserat på denna rapportering och utvärdering kommer SKB sedan att fatta beslut om huruvida KBS-3H ska utvecklas vidare. Om beslutet blir att KBS-3H ska vidareutvecklas kommer ett program för detta att utarbetas med målsättningen att höja den tekniska nivån på kunskapen till motsvarande nivå som för KBS-3V. Vi bedömer att sådana kunskaper tidigast kan finnas framme under mitten av den andra treårsperioden som detta Fud-program täcker.

11.8 Teknikutveckling i SKB:s laboratorier

Den tekniska utvecklingsverksamheten fokuserar allt mer på tester, demonstrationer och general-repetitioner i full skala. SKB har för bland annat detta ändamål byggt Bentonitlaboratoriet, Äspölaboratoriet och Kapsellaboratoriet och utrustat dem på ett sådant sätt att mycket av den återstående teknikutvecklingen som behövs kan ske där, se avsnitt 1.3.3 i del I. Andra möjligheter finns emellertid också, såsom anläggningen Onkalo i Finland som är under utbyggnad. Flera laboratorier i berg och för metallurgisk forskning finns dessutom i Europa och i andra världsdelar. Därtill kommer produktionsanläggningar i många länder med utrustning och kunskap i de frågor SKB har att lösa. Eftersom våra laboratorier är speciellt utformade för att uppfylla våra ändamål och krav, kommer vi framför allt att arbeta i dem.

Den utveckling och de demonstrationer som genomförs eller planeras i respektive laboratorium redovisas i tabell 11-1.

Tabell 11-1. Arbeten som genomförs eller planeras i SKB:s laboratorier.

Utveckling och demonstration	Bentonitlaboratoriet	Äspölaboratoriet	Kapsellaboratoriet	Se text i avsnitt	Utveckling och demonstration	Bentonitlaboratoriet	Äspölaboratoriet	Kapsellaboratoriet	Se text i avsnitt
Berglinjen					Kapsellinjen				
Instrument i borrhål					Oförstörande provning av kapselkomponenter			X	14.3.2 14.4.2
Stabilisering av borrhål		X		12.3.1					
Geofysiska borrhålsinstrument		X		12.3.3	Optimering av svetsprocessen och lock/bottenutförning			X	14.5.1
Bergmekaniska mätningar		X		12.3.4					
Mätning av termiska egenskaper		X		12.3.5	Oförstörande provning av svets			X	14.5.2
Utrustning för hydrotester		X		12.3.6	Transportfordon i ramp		X		14.8
Instrument i tunnlar och deponeringshål					Omlastningsstation under jord		X		14.8
Laserskanning		X		12.3.2	Deponeringsmaskin		X		14.8
Bergmekaniska mätningar		X		12.3.4	Temperaturutveckling i deponeringshål	X	X		13.5
Mätning av vatteninflöde i tunnlar och ramp		X		12.3.7					
Mätning av inflöde till deponeringshål		X		12.3.8					
Bestämning av sorptionsparametrar		X		12.3.9	Återfyllningslinjen				
Bestämning av pH och redoxpotential		X		12.3.10	Installationsverktyg för block i tunnel	X	X		15.6
Fintätning av tunnel på stort djup		X		12.4	Inblåsning av pelletar/granuler	X	X		15.7
Borring för salva		X		12.5	Mock-up storleksskala 1:4	X			15.6
Sprängämne och tändare		X		12.5	Tester i storleksskala 1:1		X		15.6
EDZ hydroteknikmätning		X		12.5	Installation av plugg		X		15.8
EDZ koppling störning och hydraulisk konduktivitet		X		12.5					
Linsågning		X		12.5					
Borrutrustning för deponeringshål		X		12.7					
Sprutbetong		X		12.6	Förslutningslinjen				
Bergbultning		X		12.6	Bergkross och andra kandidatmaterial	X	X		16.3
Vägbeläggning		X		12.6	Frysning av borrhålsmaterial		X		16.4
					Frysning av schakt- och rampmaterial		X		16.3
Buffertlinjen									
Lyftverktyg för buffertblock	X	X		13.6					
Kran för buffertblock	X	X		13.6					
Inredning deponeringshål	X	X		13.5					
Buffertskydd	X	X		13.5					
Buffertinstallation	X	X		13.6					
Inblåsning av pelletar/granuler	X	X		13.7					

12 Berglinjen

Berglinjen omfattar tillredning och bygge av alla utrymmen i undermarksanläggningen. Detta innebär berguttag för deponeringstunnlar, stamtunnlar, transporttunnlar, centralområde, schakt och ramp. I bergarbetena ingår att injektera berget runt utrymmena för att minska inflödet av vatten samt att förstärka berget med bergbultar, sprutbetong och nät. Berglinjen omfattar också de undersökningar och den geologiska kartering som sker i samband med bygget.

Av färgsättningen av berglinjen för deponeringsområdet framgår inom vilka områden det finns känd och beprövad teknik som kan appliceras på slutförvaret samt för vilka det krävs teknikutveckling, se figur 12-1. Figuren beskriver SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag. För de områden som markerats med grå eller grön färg förutsätts normala projekteringsinsatser räcka för att specificera konstruktion och genomförande av de åtgärder som behövs. I något fall kan verifierande tester vara motiverade. För de områden som markerats med gul eller röd färg behövs teknikutveckling. För flera av de gulmarkerade områdena har tester genomförts, men SKB anser att ytterligare insatser för vidareutveckling eller optimering är motiverade.

Deponeringsort		Deponeringshål	
Takort	Pall		
Undersökning/ karakterisering	Undersökning/ karakterisering	Undersökning/ karakterisering	Känd och beprövad tillämpning i dag
Injektering	Injektering	Borring av pilothål	Känd och beprövad teknik som kan appliceras
Borring	Linsågning	Rymning med krona neråt	Känd och provad teknik som kan appliceras efter tester
Laddning	Spräckning	Kaxhantering	Teknik som inte är känd eller tillräckligt utprovad i den tilltänkta användningen
Sprängning	Lastning	Uttag avfasning för strålskärm	
Lastning	Skrotning	Kartering	
Skrotning	Temporär berg- förstärkning (bult)		
Temporär berg- förstärkning (bult)	Kartering		
Kartering	Kontroll av EDZ		
Kontroll av EDZ			
Efterinjektering			
Permanent berg- förstärkning (sprutbetong, nätning)			

Figur 12-1. Berglinjen för deponeringsområde – SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag.

12.1 Nuläge

I Sverige finns lång erfarenhet av att bygga i berg. Världsledande teknik har utvecklats av svenskt bergsbruk. Den kunskapen kommer vi att kunna använda när vi karakteriserar berget samt borrar, spränger, skrotar och förstärker det. Arbetet måste dock utföras med stor precision för att uppfylla de krav som ställs på slutförvaret.

Ett välkänt fenomen är att det bildas en mer eller mindre störd zon runt tunnlar och bergrum vid uttag. Hur zonen ser ut beror på om tunneln sprängs eller borrar. Zonens hydrauliska egenskaper kan, om störningen är alltför stor, påverka förvarets funktion på lång sikt. I dag finns kunskap om hur vi kan begränsa inverkan av den störda zonen. Däremot är kunskapen inte tillräcklig om hur de hydrauliska egenskaperna påverkas av den störda zonens omfattning och hur vi ska kunna visa detta. Vi bedömer dock att den störda zonens betydelse kan byggas bort genom försiktig och kontrollerad teknik för borrning och sprängning. En annan viktig fråga är att kunna kontrollera och mäta de hydrauliska egenskaperna hos den störda zonen runt tunnlar och övriga utrymmen. Detta har framför allt betydelse runt deponeringstunnlar och deponeringshål.

I deponeringstunneln behöver botten göras plan och horisontell. Dimensionerande för hur plan botten måste vara är deponeringsmaskinens krav på jämnhet och lågt rullmotstånd. Även i återfyllningslinjen finns ett önskemål om att kunna placera lerblocken direkt på berget. För att minimera skadezonen i botten kan man dela upp berguttaget i två steg. Först borrar och sprängs en takort. Med takort menas den översta delen av tunneln, närmast taket. Den återstående delen av tvärsnittet, pallen, kan därefter tas ut antingen med försiktig borrning och sprängning eller med linsågning. Linsågning lämnar en mycket slät botten. SKB behöver dock demonstrera metoden i realistisk miljö innan vi kan säga om den kan användas i slutförvaret.

Borrningen av deponeringshålen har vi visat fungerar bra, men ännu återstår att visa att metoden också kan klara av den kapacitet som slutförvarsanläggningen ska dimensioneras för – en deponerad kapsel per dag.

Problemet med vatteninflöde till undermarksanläggningen kommer vi inte helt att kunna lösa med befintlig teknik. På det djup förvaret ligger är vattentrycket högt. Även små sprickor, eller system av hopkopplade sprickor, leder vatten. Eftersom injekteringsmaterialet och metoden för injektering behöver anpassas efter sprickornas och spricksystemens egenskaper, blir frågan komplex ur ett vetenskapligt perspektiv. Dessutom får injekteringsmaterialet inte leda till högre pH än 11 i grundvattnet när det lakas ut. Annars kan förvarets långsiktiga funktion försämrats.

Två frågor framstår som särskilt utmanande i utvecklingsarbetet inom berglinjen: injektering på stora djup och in situ-bestämning av den störda zonens hydrauliska egenskaper. Tätningen måste lyckas för att slutförvaret ska kunna byggas och återfyllas. Bestämningen av den störda zonens hydrauliska egenskaper påverkar däremot inte säkerheten i slutförvaret i sig, eftersom bergtekniken förutses resultera i egenskaper hos zonen som inte äventyrar den långsiktiga säkerheten hos slutförvaret. I bestämningarna av zonens egenskaper är det viktigt att kunna visa att de ligger inom givna gränser. Bekräftande mätningar i fält har framför allt betydelse i deponeringshål och deponeringstunnlar.

12.2 Krav och förutsättningar

Bergkonstruktioner definieras av SKB som de utrymmen i berget som behövs för undermarksanläggningen. Bergkonstruktionerna ska vara utformade så att de inte signifikant försämrar förvarsbergets barriärfunktioner. I sammandrag innebär kraven att miljöpåverkan vid bygge och drift ska vara begränsad, bergkonstruktionerna ska rymma undermarksanläggningen, tillåta deponering och anpassas till berget på ett sådant sätt att funktionerna isolering och fördröjning kan upprätthållas. Bergkonstruktionerna ska inte försämma bergets naturliga förmåga att fördröja transport av radionuklider från förvarsnivån till biosfären. Kraven påverkar såväl materialval som val av metoder för utförande.

Kraven på de metoder och den utrustning som ska användas vid bygget av slutförvaret är att:

- Inför undersökningarna av berget ska karakteriseringsmetoder och instrument vara utvecklade.
- Vatteninflödet till olika delar av förvaret ska understiga specificerade värden. Detta ska vid behov åstadkommas med injektering.
- De material och metoder som används för att förstärka berget ska inte äventyra säkerheten på lång sikt.
- Utbyggnaden av förvaret ska påverka berget i begränsad omfattning. Berguttag av deponeringstunnlar ska ske på ett sådant sätt att den störda zonen i deponeringsområdet uppfyller specificerade krav.
- Deponeringshålen ska kunna borras enligt specificerade krav på geometri.

I kapitel 26 i del IV redovisas de processer som kan påverka berget på lång sikt och de egenskaper berget i närområdet ska ha i sitt initialtillstånd för att på bästa sätt uppfylla funktionen på lång sikt. För att på förhand kunna belägga att den tekniska utvecklingen leder till att de metoder och maskiner vi tar fram verkligen uppfyller de ställda kraven, kommer vi att gå igenom och sammanställa de kontroller och den dokumentation, som under drift ska säkerställa kvaliteten.

Berglinjens teknikutveckling inriktas i dagsläget på ett initialtillstånd med en störd zon runt tunnlar, ramp, schakt, bergrum och deponeringshål som uppfyller preciserade hydrauliska egenskaper. Nyckeltalen är zonens utbredning och dess hydrauliska konduktivitet. Indikatorer är zonens djup och porositet samt ytkonturens jämnhet. Andra indikatorer är bormaskinens prestanda och sprängteknikens precision. En komplikation är att tätning med injekteringsmedel kommer att göras. Observationer av vatteninflöde kan därför bara delvis ske i berg med uteslutande naturliga egenskaper. Initialtillståndet i deponeringsorten avser också sulans släthet, vilken i sin tur har betydelse för kvaliteten i återfyllningslinjen.

12.3 Undersökning och karakterisering

I detta avsnitt redovisas den teknikutveckling av metoder och instrument som SKB bedömer är nödvändig för att kunna genomföra geovetenskapliga undersökningar av berget under bygge och drift av slutförvarsanläggningen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB har inte tidigare redovisat behovet av att utveckla de metoder och instrument, som behövs för de undersökningar som kommer att göras vid bygge och drift av slutförvaret. Fud-program 2001 innehöll dock en kort redovisning av området inför de då kommande platsundersökningarna.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

SKB utvecklade, förbättrade och testade undersökningsmetoder och mätinstrument inför platsundersökningarna. Vi byggde upp system och rutiner för datahantering och platsbeskrivande modeller samt för att överföra information mellan undersökningar, projektering och säkerhetsanalys /12-1, 12-2/.

Experiment och mätningar i Äspölaboratoriet har gett erfarenheter av undersökningar i schakt och tunnlar. De undersökningsmetoder som användes vid bygget av Äspölaboratoriet finns beskrivna i /12-3/. Rapporten redovisar det huvudsakliga användningsområdet för olika undersökningsmetoder. Där finns också en bedömning av respektive metods lämplighet för att kartlägga nyckelfrågor för de olika platsmodellerna (geologi, hydrogeologi etc). Rapporten beskriver i huvudsak kunskapsläget 1997, så erfarenheterna ligger många år tillbaka i tiden. Sedan dess har ytterligare erfarenheter vunnits. Bland annat har True-projektet gett viktiga kunskaper om hur man bestämmer bergets transportegenskaper.

Mot denna bakgrund bedömer SKB att vi har tillgång till – och en gedigen erfarenhet av – metoder och instrument för de undersökningar som kommer att genomföras i samband med att slutförvaret byggs. Arbetssättet kommer emellertid att behöva utvecklas, på grund av de ökande kraven på snabbhet och effektivitet vid bygge och drift. Samtidigt behöver vissa instrument och metoder förbättras. I något fall behövs helt nya metoder, eftersom nya eller strängare krav tillkommit. Ny bättre teknik kan också ha blivit tillgänglig. SKB tänker även fortsättningsvis använda Äspölaboratoriet för forskning och demonstrationsförsök av olika slag.

SKB planerar insatser inom följande områden:

- Stabilisering av borrhål.
- Laserskanning.
- Geofysiska borrhålsinstrument.
- Bergmekaniska mätningar.
- Mätning av bergets termiska egenskaper.
- Utrustning för hydrotester (enhålstester).
- Mätning av vattenflöde i ramp och tunnlar.
- Mätning av inflöde till deponeringshål.
- Bestämning av sorptionsparametrar.
- Bestämning av pH och redoxförhållanden.
- Informationssystem och informationsteknik.

I avsnitt 12.3.1 till 12.3.11 ges en nulägesbeskrivning för de uppräknade områdena, följt av SKB:s program för att utveckla instrument och metoder inom dessa områden.

12.3.1 Stabilisering av borrhål

Borrhål som passerar deformationszoner med svaga och kanske också vattenförande bergpartier kan behöva stabiliseras för att inte utrustningar ska fastna. Borrhålen kan också behöva stabiliseras innan de försluts. Detta gäller både hål borrade från ytan och från tunnlar. Det som skiljer hål borrade från markytan och hål borrade från tunnlar kan vara borrhålsriktningar samt att tunnelborrhålens mynnningar ligger under grundvattenytan. Vidare kan de höga vattentrycken och de potentiellt höga vattenflödena på stora djup ge problem att föra in utrustning i borrhålet. Horisontella och svagt lutande hål innebär en större risk för ras (infallande stenar med mera) och därmed att utrustningen fastnar.

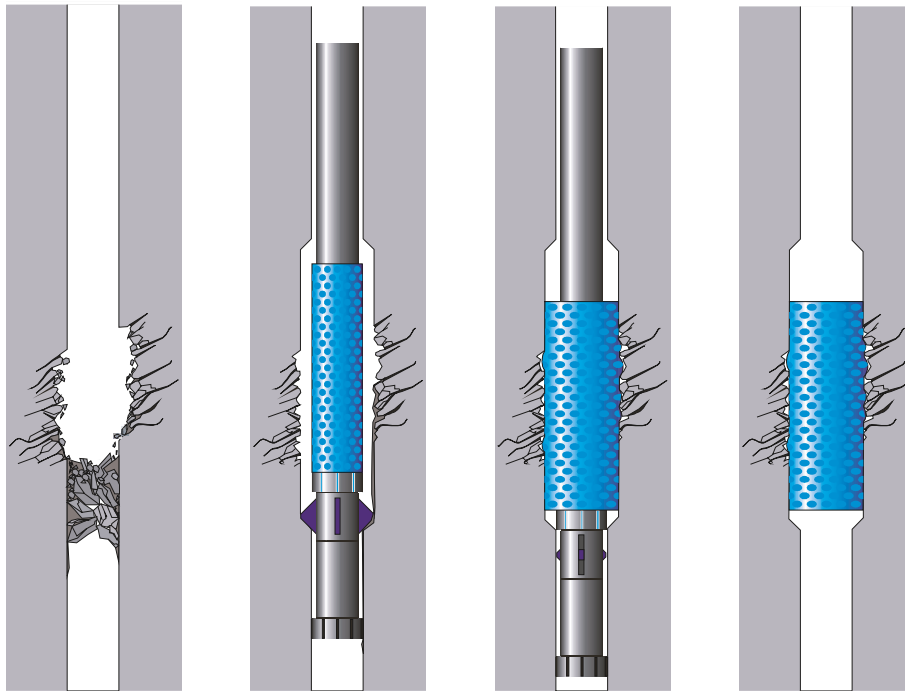
Det behövs troligen mer än en metod för att stabilisera borrhålsväggar. Flera faktorer påverkar valet av metod, bland annat om det är ett hål borrar från ytan eller nere i berget, hur mycket hålet lutar, vilken typ av mätningar som ska utföras i hålet samt typen av uppkrossning.

Under platsundersökningarna har SKB utvecklat teknik för att stabilisera borrhålsväggar. En metod går ut på att installera perforerade rostfria plåtar i den del av borrhålet där berget är försvagat. Figur 12-2 illustrerar hur detta genomförs. Tekniken har använts i både Forsmark och Oskarshamn och erfarenheterna är goda. En annan teknik är att stabilisera borrhålet med cement där det passerar den svaga zonen. Först vidgas hålet, därefter gjuter man igen sektionen för att slutligen borra igenom pluggen. Denna teknik har utvecklats på Äspölaboratoriet och provats i Onkalo.

Program

Båda de ovannämnda teknikerna kommer att vidareutvecklas. Ny teknik på idéstadiet finns också. Då valet av material för att stabilisera borrhålen kan ha betydelse för förvarets funktion, är det angeläget att analysera konsekvenserna av detta när tekniken utformas. Likaså är det viktigt att testa metoderna under realistiska förhållanden ända ner till förvarsdjup.

Frågan om stabilisering av undersökningshål tas också upp i förslutningslinjen i avsnitt 16.5.



Figur 12-2. Illustration av den sekvens av åtgärder som genomförs för att stabilisera borrhållsväggar i deformationszoner /12-4/.

12.3.2 Laserskanning

SKB har i projektet ”Rock Characterisation System – RoCS” genomfört en förstudie av olika system för bergkartering av tunnlar och deponeringshål tillsammans med Posiva. Studien har framför allt koncentrerats på digital fotogrammetri och laserskanning i kombination med digitalfotografering. Förstudien har fokuserat på geologisk kartering, men resultatet skulle kunna nyttjas av andra discipliner än geologi /12-5/.

Förstudien förordar att laserskanning, kombinerad med digitalfotografering, ska ingå i ett nytt karteringssystem. Denna kombination ger en bild som påminner om ett färgfoto i tre dimensioner och där varje punkt är koordinatsatt, se figur 12-3. Rekommendationen baseras på att undersökningsmetoden är snabb och att den geologiska karteringen kan ske med större precision än med nuvarande metod.

Förstudien har identifierat ett flertal befintliga karteringssystem, som arbetar i två dimensioner. SKB:s TMS (Tunnel Mapping System) är ett av dem. Endast några få system kan hantera tre dimensioner. Modelleringen görs däremot i tre dimensioner. Det finns dessutom flera program som kan överföra laserskanningsdata till format som kan hanteras av olika CAD-system.

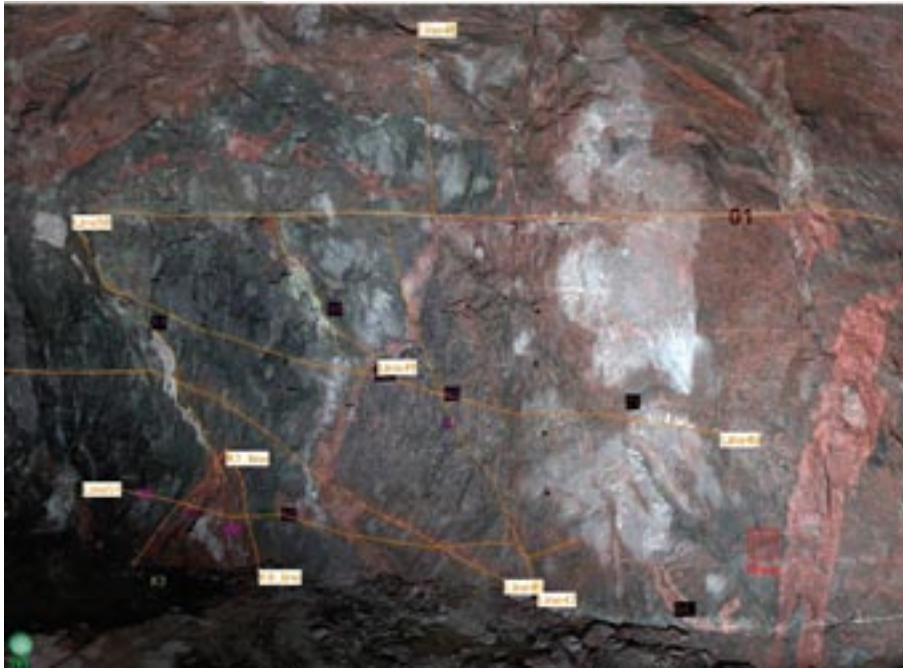
Program

SKB:s mål är att ha ett nytt karteringssystem för tunnlar och deponeringshål framme till byggstart. Systemet ska utnyttja laserskanning och data ska kunna överföras till och nyttjas av SKB:s modelleringssystem RVS (Rock Visualisation System) eller en eventuell efterföljare till RVS.

En fortsättning av projektet RoCS planeras. Varje disciplin – geologi, hydrogeologi, bergmekanik etc – kommer att ställa sina krav på karakteriseringssystemet. Det första steget blir att ta fram en kravspecifikation.

12.3.3 Geofysiska borrhållsinstrument

Vid platsundersökningarna i Oskarshamn och Forsmark har geofysisk borrhållsloggning med sex olika sonder utförts i samtliga borrhål. Med dessa sonder produceras 15 olika borrhållsloggar (densitet, susceptibilitet, resistivitet med flera). Utöver dessa loggningar har TV-loggning med



Figur 12-3. Kombination av laserskannad bild och digitalfoto. Ett antal linjer (mestadels sprickor) har lagts in med hjälp av det rithjälpmiddel som ingår i skannerns programvara.

Bips (Borehole Image Processing System) samt radarloggning utförts. Dessa geofysiska loggningar har visat sig vara ett viktigt stöd vid den geologiska tolkningen.

En central metod är TV-loggningen. Tekniken har varit stommen i den geologiska karteringen och identifieringen av sprickorienteringen. Bips är ett välkänt system som SKB har stor erfarenhet av. Undersökningar med ultraljud (Acoustic Televiewer) har tidigare betraktats som ett udda instrument utan preciserat tillämpningsområde. Detta instrument har dock visat sig ha potential för mätning av sprickorientering och som logg för precisionsmätning av ett borrhåls diameter längs hela hålet. Det går även att använda som stöd vid mätning av borrhålets position utmed dess längd.

Program

SKB:s Bips-utrustning införskaffades 1994. Det är därför relevant att undersöka dagens marknad för system med TV-loggning. Viktiga parametrar – utöver bildkvalitet och upplösning – är sondens förmåga att registrera orienteringen korrekt. Ett alternativ till att köpa en ny sond är att undersöka om SKB:s utrustning kan uppdateras, så att mjukvaran automatiskt korrigerar Bips-bilden då sonden roterar.

Under platsundersökningarna har vissa tekniska frågeställningar när det gäller Acoustic Televiewer upptäckts. Dessa behöver utredas innan metoden kan användas rutinmässigt.

12.3.4 Bergmekaniska mätningar

Av de två huvudmetoderna, överborrningsmätning och hydraulisk spräckning, som tillämpats vid platsundersökningarna har ingen fungerat optimalt på större djup. Problemet har utretts noga i samband med utvärderingen av mätdata, speciellt avseende resultat från Forsmark /12-6/.

En huvudteori är att uppkomst av mikrosprickor i överborrningskärnan stör mätresultaten, en förklaring som verkar plausibel. Från ett in situ-tillstånd med höga spänningar sker en snabb spänningsavlastning samtidigt som överborrningen i kvartsrikt hårt berg, som det i Forsmark, ger förhöjd temperatur. Därmed tillförs icke-elasticiska töjningar, och antaganden om elastisk respons vid överborrningen gäller inte fullt ut. I stället uppstår mikrosprickor i provet. Överborrningsmetoden har också problem med limningstekniken och kontrollerad borring på större djup. En lösning som

övervägts är att konstruera en Borresond för grövre borrhål, till exempel 86–100 millimeter, för att på så vis erhålla grövre, och därmed eventuellt mindre störningskänsliga överborrningskärnor. SKB har därför noga utvärderat möjligheterna och nyttan av att utföra bergspänningsmätningar med överborrningsmetoden på borrhåll med större diameter. Utvärderingen har omfattat både numeriska beräkningar och erfarenheter från mätningar i URL i Kanada. Slutsatsen är entydig: problemet med ”ring discing” kvarstår när man ökar diametern på borrhållan vid bergspänningsmätningar med överborrningsmetoden. I de numeriska beräkningarna studerades borrhåll med 76 millimeter respektive 150 millimeter och mätningarna i URL gjordes på 96 millimeter respektive 50 millimeter. Att öka diametern på borrhållan är förknippat med väsentligt ökade kostnader. Mot denna bakgrund avser inte SKB att vidare studera möjligheterna att ta ut en större kärna vid överborrning.

Beträffande hydrauliska metoder (HF-HTPF-mätningar) har SKB utnyttjat såväl traditionell teknik för sprickidentifiering och -orientering (avtrycksmanschett) som modern teknik (Mosnier tool). Den senare tekniken är avsevärt mer kvalificerad i sina möjligheter att analysera testresultaten än den gamla tekniken. Även de hydrauliska metoderna har dock visat sig ha stora begränsningar vid förhållanden som de i Forsmark /12-6/.

Program

SKB anser inte att ytterligare utveckling av metoder för att mäta bergspänningar i borrhål från markytan är motiverad. I stället tänker vi få information om spänningstillståndet på slutförvarsplatsen genom deformationsmätningar i samband med tunneldrivningen. Man bör dock i det sammanhanget ta hänsyn till att en stor del av den totala deformationen i tunnlar sker momentant vid bergguttaget och den delen av deformationen kan därför inte mätas.

12.3.5 Mätning av bergets termiska egenskaper

Karakterisering av berggrundens värmeledningsförmåga och dess variationer i rummet är kostnads- och tidskrävande om den ska genomföras med hjälp av bestämningar i laboratorium. Det finns därför ett behov av att utveckla rationellare och billigare fältmetoder. Inom ramen för platsundersökningarna har ett utvecklingsarbete fokuserat på andra sätt att bestämma bergarternas värmeledningsförmåga.

Värmeledningsförmågan hos en kristallin bergart beror generellt sett på mineralsammansättningen, densiteten och värmeledningsförmågan för de mineraler som ingår i bergarten. Utifrån idealiserade mineralsammansättningar för magmatiska bergarter har ett generellt samband mellan densitet och värmeledningsförmåga demonstrerats. Vidare har detta samband kunnat verifieras med hjälp av värden som mätts upp på laboratorium. Dessa mätningar har utförts på bergkärnor från platsundersökningsområdena. Med geofysiska borrhållsloggningar (gammasonder), som mäter densitetsvariationer, har det sedan varit möjligt att bestämma såväl värmeledningsförmåga som rumsliga variationer för framför allt sura och intermediära magmatiska bergarter /12-7, 12-8/.

Program

Under platsundersökningarna har olika metoder för att i fält mäta bergets värmeledningsförmåga från markytan diskuterats. Ett alternativ är att modifiera befintliga metoder för mätning på hållar (en- och flersondsmetod). Mätningar in situ med flersondsmetoden har utförts i Forsmark och Laxemar. Ett annat alternativ är att utveckla det hydrogeologiska mätsystemet PSS (Pipe String System) för att kunna mäta värmeledningsförmågan i omgivande berg i ett borrhål. Pulstester med varmvatten i befintliga borrhåll har ännu inte genomförts.

Vilken metodutveckling som kan behövas ska analyseras. Bland annat kommer möjligheterna att tillämpa såväl flersondsmetoden som metoden med värmepuls i kärnborrhål att utvärderas.

12.3.6 Utrustning för hydrotester (enhållstester)

Utrustningarna som användes vid bygget av Äspölaboratoriet fungerade enligt de från början uppsatta kraven. Dessa föreskrev bland annat att hydrotesterna för underjordsändamål i huvudsak skulle utföras som så kallade utflödestester. Utrustningarna var dock inte optimalt utformade när det gäller att minimera mät- och etableringstider.

Ett antal grupper med olika ansvarsområden (projektering, bygge, modellering och säkerhetsanalys) kommer att medverka vid utbyggnaden av förvaret. Grupperna kommer att ha olika önskemål om vilka mätningar som ska utföras, mätområden, mätnoggrannheter med mera. I Äspölaboratoriet har SKB bestämt bergets hydrauliska egenskaper genom främst sektionsvisa mätningar med manschettssystem men även – fast i mindre omfattning – genom flödesmätningar längs borrhål med Posiva Flow Log (PFL). Med sektionsvisa mätningar går det att mäta både stora (upp till cirka 50 liter per minut) och små flöden. Det är också möjligt att utvärdera typ av flödesregim för de aktuella flödesanomalierna, men mätinsatsen blir stor om man exakt ska lägesbestämma hydrauliska anomalier längs hela borrhålet. Vid flödesmätningar längs borrhål med PFL går det inte att mäta flöden på hydrauliska anomalier som är större än 5–10 liter per minut. Under utbyggnaden av slutförvaret kommer båda mätmetoderna att behövas.

Program

Inför utbyggnaden av slutförvaret planerar SKB att ta fram två typer av hydrotestutrustningar. Båda ska vara snabba att etablera och funktionella.

- Utrustning för mätningar i långa undersökningshål. Den ska till sin funktion likna SKB:s befintliga utrustning som har använts i Äspölaboratoriet. Mätningarna utförs i form av utflödestester. Hela borrhålet tätas av vid borrhålsmyningen i samband med att sektionsvisa mätningar sker längs hålet. Sektionen innanför den aktiva mätsektionen förbinds med den yttre sektionen, så att trycken i de sektioner som omger mätsektionen blir lika.
- Utrustning för mätningar i framför allt sonderingsborrhål. Den ska vara mycket tålig, flexibel och extremt snabbetablerad, så att den kan användas när man stöter på viktiga flödande sprickor. Mätningarna ska kunna utföras i form av enkelmanschett- eller dubbelmanschettmätningar och göras med över- och undertryck.

12.3.7 Mätning av vattenflöden i ramp och tunnlar

Den metod, som används vid Äspölaboratoriet för att mäta flöden längs tunnlar fungerade inte helt perfekt i början av bygget av Äspöanläggningen bland annat eftersom de mätdammar som anlades snabbt fylldes med finmaterial från bergarbetena. Mätningarna går så till att vatten, som läcker in till tunneln, samlas upp i dammar placerade tvärs över tunneln. Flödena ut från dammarna mäts med så kallade mätöverfall. Utrustning och metod har förbättrats, men ytterligare förbättringar är nödvändiga.

Program

Målsättningen är att mätsystemen ska ha tillräcklig mätnoggrannhet. De ska också vara lätta att installera, lätta att anpassa till utbyggnaden av tunneln, samt lätta att rengöra och kalibrera. Mätningarna ska störa bergarbetena så lite som möjligt och vice versa. I arbetet ingår en översyn av sensorer samt en revidering av skötselinstruktioner och kalibreringar. Parallellt bör andra metoder för att samla upp och mäta vattenflöden längs tunnlar studeras. Vattnet måste dock samlas upp i dammar. Mätsystemet bör däremot kunna förbättras. Detta kan till exempel ske genom att man leder in vattnet i en rörledning efter dammen och mäter med beröringsfria induktiva flödesmätare.

Om någon av de inventerade metoderna är tillräckligt intressant görs en test av denna – i första hand i Äspölaboratoriet.

12.3.8 Mätning av inflöde till deponeringshål

Bergets hydrauliska egenskaper har stor betydelse för om en deponeringsposition kan godkännas eller om den måste överges. Viktiga hydrauliska parametrar är inflödet till deponeringshålet, flödesfördelningen och det omgivande bergets transmissivitet.

I Prototypförvaret i Äspölaboratoriet har mätningar och bestämningar av hydrauliska parametrar utförts /12-9/. Erfarenheterna kan summeras i följande punkter:

- Totalflödet in till hålet bestämdes genom att mäta magasinsförändringen i hålet. Metoden fungerade bra och bör kunna tillämpas i slutförvaret.

- Flödesfördelningen längs borrhålsväggen mättes med hjälp av sorberande material. Arbetet var tidskrävande och ytterligare utveckling är nödvändig.
- Hålets transmissivitet beräknades utifrån uppmätta totalinflöden samt tryckförhållanden i anslutning till hålet. Beräkningen av hålets transmissivitet ansågs något osäker.

Slutsatsen är att effektivare metoder behöver utvecklas.

Program

Utvecklingen och valet av metodik och metoder för undersökningar och mätningar i deponerings-tunnlar och deponeringshål kommer att ske samordnat i ett gemensamt projekt för alla berörda ämnesområden. Utvecklingsinsatser behövs för följande mätningar:

- Kvalitativ kartläggning av flöden och positioner för läckagepunkter i borrhålsväggen. I utvecklingen ingår att ta fram en skannerfunktion som kan användas i samband med övrig dokumentation av borrhålsväggen.
- Kvantitativ mätning av de två till tre största flödena längs borrhålsväggen. I utvecklingen ingår att ta fram uppsamlingsanordningar för vatten. Dessa ska lätt och snabbt kunna monteras på borrhålsväggen.
- Bestämning av transmissiviteter med hjälp av hydraultester. För att man ska få tillförlitliga data måste berget vara vattenmättat. Det förutsätter att hålet varit vattenfyllt en lång tid innan mätningar görs så att all luft lösts i vattnet.

12.3.9 Bestämning av sorptionsparametrar

I det generella platsundersökningsprogrammet /12-2/ identifierades ett behov att kunna visa att de retentionsparametrar (K_d och katjonutbyteskapacitet) som bestäms i laboratorium överensstämmer med de parametrar som bestäms under förvarslika förhållanden. Mätningar i laboratorium görs på borrhålskärnor tagna från förvarsdjup, men tryckavlastning och bearbetning av proverna kan skapa mikrosprickor och ge ändrade kemiska förhållanden i proverna. Sorptionsmätningar görs i huvudsak på krossat bergmaterial. Endast ett fåtal mätningar utförs på hela bitar i ett första försök till uppskalning. Nästa steg i processen för uppskalning är att utföra tester in situ under förvarsliknande förhållanden.

Program

Försök under platsundersökningarna har visat på de svårigheter som finns att utföra in situ-bestämningar i borrhål på stora djup. Utvecklingen av metoder enligt förslaget i /12-2/ har därför avbrutits. Ett alternativ är att utnyttja de metoder som arbetats fram inom LTDE-projektet (Long term diffusion experiment) i Äspölaboratoriet. Den utrustning och de metoder som används där är dock komplicerade. De är inte möjliga att direkt använda på flera platser. En förenklad utrustning för att bestämma sorptionsparametrar, K_d och/eller katjonutbyteskapacitet (CEC) kommer att utvecklas.

12.3.10 Bestämning av pH och redoxförhållanden

Apparatur för att mäta pH och redoxförhållanden in situ har utvecklats inom ramen för flera projekt vid Äspölaboratoriet /12-10, 12-11/. Dessa instrument togs fram för att kunna mäta kontinuerligt under hela tiden som experimentet pågick. Ett första försök med ett portabelt instrument, som skulle kunna användas för pH- och Eh-mätningar var som helst i Äspölaboratoriet, gjordes i Prototypförvaret. Alla instrument hittills har innehållit speciellt anpassad elektronik. Kommersiella instrument har visat sig ha problem i tunnelmiljön, även om de fungerat bra i laboratorium.

Program

Det finns behov av att utveckla och testa flera instrument för in situ-mätningar av pH och Eh. Syftet är att kunna göra mätningar även i borrhålssektioner med ett litet grundvattenflöde. Inför slutförvarets byggskede kommer SKB att fortsätta arbetet att utveckla nya instrument för grundvattenkaraktärisering – främst för pH- och Eh-mätningar i direkt anslutning till borrhål i tunnlar.

12.3.11 Informationssystem och informationsteknik

SKB har genom åren införskaffat, anpassat och utvecklat ett flertal informationssystem, som är speciellt anpassade för våra behov. Inför bygget av Äspölaboratoriet och även inför platsundersökningarna gjordes särskilt stora insatser för att få tillgång till moderna och effektiva system. För att minska riskerna för felaktigheter vid överföring av information mellan systemen, men även för att effektivisera arbetet, har systemen i flera fall integrerats.

Program

SKB kommer att fortsätta arbetet med att förbättra och anpassa informationssystemen. Utbyggnaden och driften av slutförvaret kommer att pågå under lång tid. Det finns därför betydande vinster att göra om verksamheten får tillgång till väl integrerade och effektiva system. Detta ökar samtidigt kvaliteten och säkerheten. Informationsbehoven kommer att identifieras utifrån planerade arbetsprocesser vid bygget och driften av slutförvaret. Därefter identifieras det stöd som behövs i form av informationssystem och lagringsstrukturer.

SKB bedömer att det i många fall är tillräckligt att anpassa befintliga system. Men vissa system, som tunnelkarteringssystemet, måste genomgå större förändringar i samband med att ny teknik (laserskanning) tas i bruk. Integrationen mellan systemen måste ägnas speciell omtanke, beroende på de korta tidscyklerna med krav på snabb interaktion mellan undersökningar och mätningar, modellering samt projektering, bygge och drift.

Lagringsstrukturer och lagringsteknik i form av databaser måste vidareutvecklas för att hantera de stora mängder data som kommer att samlas in under bygge och drift av slutförvaret. I samband med detta måste även informationstekniken (datorer och nätverk med sina programvaror) vidareutvecklas för att klara kraven på att kunna hantera stora datamängder direkt vid tunnelfronten samt för att kunna visualisera insamlade data i realtid.

12.4 Tätning med injektering

Slutförvaret kommer att placeras i berg av huvudsakligen god kvalitet med låg frekvens av vattenförande sprickor. Ändå kommer tätningsåtgärder att bli nödvändiga för att vi ska klara deponering och återfyllning med de kvalitetskrav som ställs. Vi avser att göra tätningen med hjälp av injektering.

De krav som ställs avseende anläggningens täthet är desamma som gäller för i stort sett varje annan berganläggning – en begränsad avsänkning av grundvattenytan med hänsyn till sättningar, miljö och vattenförsörjning, samt ett begränsat inflöde med hänsyn till anläggningens användning. Dessutom finns krav som är kopplade till den långsiktiga säkerheten. Dessa är att inträngningen av djupare liggande saltvatten ska begränsas med hänsyn till hur buffert och återfyllning påverkas. Även punktflöden och ackumulerade flöden måste begränsas. Annars skulle de kunna ge upphov till erosion av buffert och återfyllning. Kraven på slutförvarets långsiktiga funktion leder till vissa restriktioner i fråga om injekteringsmaterial, till exempel pH-värdet på lakprodukterna från injekteringsmedlet och använda tillsatser.

De pågående platsundersökningarna ger ett av underlagen för att bedöma omfattningen av de tätningsåtgärder som kommer att krävas. Kraven kommer att vara beroende av egenskaperna på den valda platsen och hos till exempel bufferten och återfyllningen. Projekteringen i steg D2 och de forskningsinsatser som görs utgår från att vi preliminärt behöver begränsa inläckaget i ramp och schakt, centralområdet och tunnlar fram till deponeringsområdet till tio liter per 100 meter längd samt i deponeringstunnlar till tio liter per 300 meter längd. I deponeringstunnlarna behöver vi också begränsa punktinläckagen till en liter per minut.

I de berg där konventionella tunnlar (exempelvis väg- eller spårtunnlar) byggs förekommer inte den kombination av små sprickor och höga vattentryck som finns på förvarsdjup. För att vi ska kunna uppfylla täthetskraven måste teknik utvecklas för att tätta dessa små sprickor med höga vattentryck. Vi räknar också med att passera zoner med mer vattenförande berg, som måste tätas. Även detta kräver anpassad teknik men har mycket gemensamt med befintlig konventionell teknik.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 drog SKB slutsatsen av det samarbete vi haft med Posiva och Numo att cementbaserade injekteringsmaterial, som ger lakvatten med pH lägre än 11, måste utvecklas för tätning av sprickor med en sprickvidd ner till cirka 0,1 millimeter. För finare sprickor behöver andra, icke cementbaserade, material undersökas. Silica sol hade störst potential att bli framgångsrikt.

SKI kommenterade i sin granskning att SKB bör ha en alternativ plan för hur injekteringen ska göras i slutförvaret om utvecklingsinsatserna inte leder till förväntade resultat. SKI menade också att SKB ska ta fram kunskap om tätning av större zoner eller sprickor. Ett detaljerat program för forskning, utveckling och demonstration av injektering efterfrågades.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Sedan Fud-program 2004 har kravbilderna klarnat genom att de platser som kan bli aktuella för slutförvaret har undersökts mer samt genom analys av vad som kommer att krävas vid uppförandet av ett slutförvar.

Att utveckla metoder för att få förståelse för de villkor som styr brukets spridning i bergmassan och dess inträngning i den enskilda sprickan har varit centrala områden. Ett annat område har varit injekteringsmedel med lågt pH, både cementbaserade och icke-cementbaserade. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) har gett ut en bok som handlar om cementinjektering i hårt berg /12-12/. Syftet med boken är att sprida kunskap om de senaste årens landvinningar till en bredare krets av användare.

Inom SKB:s program har flera aktiviteter resulterat i ny och viktig information. SKB har ställt samman den tillgängliga kunskapen och analyserat behovet av ytterligare kunskap om injektering inför planering och bygge av slutförvarsanläggningen /12-13/.

I ett tätningsförsök i Äspölaboratoriet användes en metodik för bergkarakterisering som förutsäger spridningen av injekteringsbruk /12-14/. Resultatet har nu ytterligare följts upp genom utborring av kärnor och studier av den faktiska spridningen av bruket. Stora mängder bruk påträffades som förväntat där karakteriseringen indikerat stora sprickor och där tunnelväggen nu är tät. De fina sprickorna påträffades också. Det kunde konstateras att dessa inte innehöll något bruk. Resultaten från injekteringen stämde väl överens med prediktionerna. Den använda karakteriseringsmetodikerna har ett angreppssätt, som innebär att en prognos görs över sprickornas transmissivitetsfördelning /12-15/ och att man identifierar den minsta spricka som måste tätas för att uppnå den önskade tätheten. Detta angreppssätt har också tillämpats i andra projekt, till exempel i Törnskogstunneln i Sollentuna /12-16/.

Ett teoretiskt grundat kriterium, som beskriver när injekteringen av ett enskilt hål ska avslutas, har tagits fram. Kriteriet baseras på sambandet mellan inträngningen av bruk och tiden för injekteringen /12-17/. Sambandet är relativt nytt och under utvärdering. Det har bland annat prövats mot fälldata från det genomförda tätningsförsöket i Äspölaboratoriet /12-18/.

I ett samarbetsprojekt mellan SKB, Posiva och Numo har lämpliga injekteringsmedel för en slutförvarsanläggning utretts /12-19/. Baserat på omfattande laboratoriearbete konstaterades att det finns såväl cementbaserat injekteringsmedel för större sprickor (vidare än 0,1 millimeter) som icke cementbaserat för mindre sprickor. Dessa material förväntas, efter optimeringsarbete, kunna rekommenderas för användning i slutförvaret. Det cementbaserade utgörs av mikrofint injekteringscement och finfördelat kiselstoft (silica fume) med en eventuell tillsats av superplasticerare. Det icke cementbaserade består av kolloidala partiklar av kisel i en vattenlösning som bildar gel när salt tillsätts (silica sol). I rapporten konstateras att silica sol inte utgör något hot mot människors hälsa eller miljön. Ett grundläggande arbete har inriktats på att bättre förstå silica sols mekaniska egenskaper som underlag för dimensionering samt funktion med hänsyn till uttorkning /12-20/.

Kunskapen om de avgörande egenskaperna hos cementbaserat bruk, såsom dess förmåga att tränga in i fina sprickor, dess reologiska egenskaper (flytegenskaper) och dess hållfasthetstillväxt har utvecklats. I /12-21/ visas och förklaras bland annat hur en finare malning av cementen inte tjänar sitt syfte att få bruket att tränga in i finare sprickor. I stället leder det till en försämrad inträngning på grund av ökad kemisk ytaktivitet. Den gamla tumregeln om att injekteringsbruk filtreras när det

försöker tränga in i en spricköppning som är mindre än tre gånger brukets kornstorlek, bekräftas också. I /12-22/ ges en beskrivning av de mekanismer som leder till injekteringsproblem som är kopplade till hållfastheten av det färskaste respektive det härdade bruket. Med hjälp av de beskrivna sambanden kan man avgöra vilka bruk som teoretiskt sett är lämpliga i en given situation. I /12-22/ belyses också behovet av att ha ett injekteringsstryck, som är tillräckligt stort i förhållande till rådande vattentryck.

Vid utbyggnaden av slutförvaret kommer större vattenförande zoner att behöva passeras. En sammanställning av olika tekniska lösningar och deras genomförbarhet har genomförts /12-23/. Studien indikerar att kontroll av vatteninflödet kan göras genom injektering, samt att frysning kombinerat med en inklädnad (lining) kan vara ett alternativ.

En konceptuell beskrivning av den förinjekterade bergmassan och trycksituationen, som en grund för en teoretiskt baserad design av efterinjektering, redovisas i /12-24/.

Insikten har ökat om vikten av att förstå hur injekteringssystemet – sprickor, injekteringsmedel, metod och teknisk utrustning – ska styras i ett organisatoriskt sammanhang. En ansats till styrd anpassning av injekteringen till de bergförhållanden som påträffas enligt observationsmetoden beskrivs i avsnitt 6.3.3 i del II.

Program

Målet för SKB:s satsningar inom området är att utveckla metoder, injekteringsmedel och utrustning för att kunna hantera de inflödessituationer som kan uppkomma i slutförvarsanläggningen.

Uppgiften är att kunna visa att det finns kunskap, metoder, material och utrustning som innebär att de specificerade kraven för injekteringen kan uppfyllas.

Eftersom SKB är en ”engångsbeställare” av undermarksanläggningar måste vi samarbeta med branschen. Baserat på den generella kompetens som finns i omvärlden måste SKB som organisation utveckla sin kompetens och anpassa sina procedurer för uppförandet av slutförvarsanläggningen. Nedan tas därför även insatser som genomförs av andra aktörer än SKB upp.

Metoder

En bred utvecklings- och demonstrationsinsats pågår i projektet ”Fintätning av tunnel på stort djup” i Äspölaboratoriet. Målen för projektet är att undersöka om silica sol är ett lämpligt material att använda på förvarsdjup och att undersöka om det under rådande vattentryck är möjligt att uppnå de täthetskrav som preliminärt ansatts för en deponeringstunnel. En knappt 100 meter lång tunnel kommer att byggas i Äspölaboratoriet för detta syfte. Genomförandet blir stegvis och planeras innehålla konventionell injekteringsskärm, skärm med hål borrade innanför tunnelkontur, efterinjektering och droppätning. Om sprickförhållandena är lämpliga kommer även cementbaserat låg-pH-bruk att testas. I projektet implementeras de tidigare presenterade karakteriserings- och bruksspridningsmodellerna. Projektet kommer även att ge erfarenheter för förbättring av bland annat resultatuppföljning och utrustning.

Ett post-doc-projekt som behandlar efterinjektering fortsätter med fälttester, baserade på den enligt ovan presenterade konceptuella modellen, i syfte att kunna föreslå lämpliga strategier för efterinjekteringsåtgärder.

En annan specialtillämpning är passagen av kraftigt vattenförande zoner. En studie planeras där data och erfarenheter från injektering av zoner vid byggandet av Äspölaboratoriet ska analyseras.

Insamling av erfarenheter från användning av höga injekteringsstryck i ett antal projekt planeras. Det doktorandprojekt där en konceptuell modell för hur bergmassan reagerar på höga injekteringsstryck och hur bruket sprider sig fortsätter.

Möjligheterna att med hjälp av en modell i tre dimensioner nå fram till en bättre bergkarakteriseringsmetodik undersöks i ett pågående licentiandarbete.

Följande aktiviteter relaterade till injekteringsprocessen bedrivs av annan huvudman än SKB:

- Ett licentiandprojekt fokuserat på droppbildning och dropp tätning.
- Ett doktorandprojekt om hur dagens kunskap kan omvandlas till praktiska och ekonomiska riktlinjer för injektering.
- En post-doc-tjänst i ämnet – karakterisering och sprickbeskrivning av berget – har inrättats.

Material

En utvärdering av det cementbaserade låg-pH-bruk, som Posiva har använt, kommer att genomföras med utgångspunkt från SKB:s behov. Beträffande låg-pH-bruk och passage av zoner så har Posiva presenterat ett program för passage av den så kallade R20-zonen i Olkiluoto /12-25/.

Konsekvenserna för den långsiktiga säkerheten av organiska tillsatsmedel i cement utvärderas i ett gemensamt projekt med Posiva och Numo.

Dessutom undersöks inträngningen av injekteringsmedel i ett pågående doktorandprojekt benämnt ”Bruks penetrationsförmåga och separation”.

Följande studier relaterade till material bedrivs av annan huvudman än SKB:

- Erosion av bruk och sprickfyllnadsmaterial. Detta projekt har direkt bäring på SKB:s projekt med höga vattentryck och hydrauliska gradienter.
- Långsiktig beständighet hos bruk. Med lång sikt menas i detta projekt cirka 100 år och slutförvarets långsiktiga säkerhet är därför inte en primär fråga, men slutförvarsanläggningen kommer att vara i drift under många år och brukets beständighet är därför av intresse för SKB. Projektet syftar till att utvärdera mekanismer och tider för nedbrytning av silica sol och cement baserat på analyser av termodynamisk stabilitet.

Utrustning och utförande

Tillgången till lämplig injekteringsutrustning måste säkerställas inför bygget av slutförvaret. En genomgång planeras som komplement till de erfarenheter som förväntas erhållas i projektet ”Fintätning av tunnel på stort djup” i Äspölaboratoriet.

Planering och utförande av injektering är med nödvändighet en iterativ process, både mellan projekteringskedan och inom drivningscykeln. Tydliga processer för design, styrning och dokumentation av injekteringsarbetena måste därför utarbetas. Baserat på nya teoretiska kunskaper och verifierande erfarenheter i fält bör en möjlig designprocess för slutförvarsanläggningen beskrivas. Den iterativa processen betingas av behovet av en anpassning till verkligt påträffade förhållanden och ska enligt SKB:s planer uttryckas i termer av observationsmetoden. Någon formell tillämpning av observationsmetoden på injektering är inte känd och det utkast till tolkning av observationsmetoden för injektering som presenteras i /12-13/ måste prövas och utvecklas, se också avsnitt 6.3.3 i del II.

12.5 Borrning och sprängning av bergutrymmen

Stora volymer berg tas ut vid byggandet av slutförvaret. Kring de hålrum som skapas i berget kommer spänningsomlagringar och deformationer att ske. Vattenförande sprickor leder till inflöde om de inte tätas. Vår uppfattning är att metoden med borrning och sprängning kan bemästra svårigheter på ett bra sätt. Därför förordar SKB den metoden för tillredning av centralområdet, transporttunnlar, stamtunnlar och deponeringstunnlar.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB drog slutsatsen från tillredningen av Apse-tunneln i Äspölaboratoriet att konventionell borrning och sprängning kan styras så att den ger begränsade skador i berget. SKI framförde vid sin granskning av Fud-program 2004 att mot bakgrund av uppställda krav bör SKB ändå överväga att välja fullortsborrnig av deponeringstunnlar och deponeringshål.

SKI påpekade också att handlingsfrihet beträffande metoder för berguttag består ända fram till uttag av deponeringsutrymmena. I praktiken blir dock handlingsfriheten starkt begränsad eftersom SKB i projekteringsarbetet av slutförvarets undermarksdel måste föreslå metoder för berguttaget i de olika utrymmena redan i nuvarande projekteringskedje. Berguttagsmetoden påverkar nämligen utformningen av utrustningen för borrhningen av deponeringshål, utrustningen för installation av buffert, deponeringsmaskinen och slutligen återfyllning och förslutning av deponeringstunnlarna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Vi har fortlöpande analyserat olika för- och nackdelar och har, med stöd i bland annat resultatet i säkerhetsanalysen SR-Can, konstaterat att utvecklingen av den störda zonen (EDZ) förefaller ha liten betydelse för nuklidtransporten, jämfört med förekomsten av naturliga sprickor som skär en deponeringstunnel. Dock förordas försiktig borrhning och sprängning i alla tunnelsystem i slutförvaret och att kvalitetskrav för detta måste tas fram. Tvärsnitt med hästskoform medger därtill ett effektivare utnyttjande av arean.

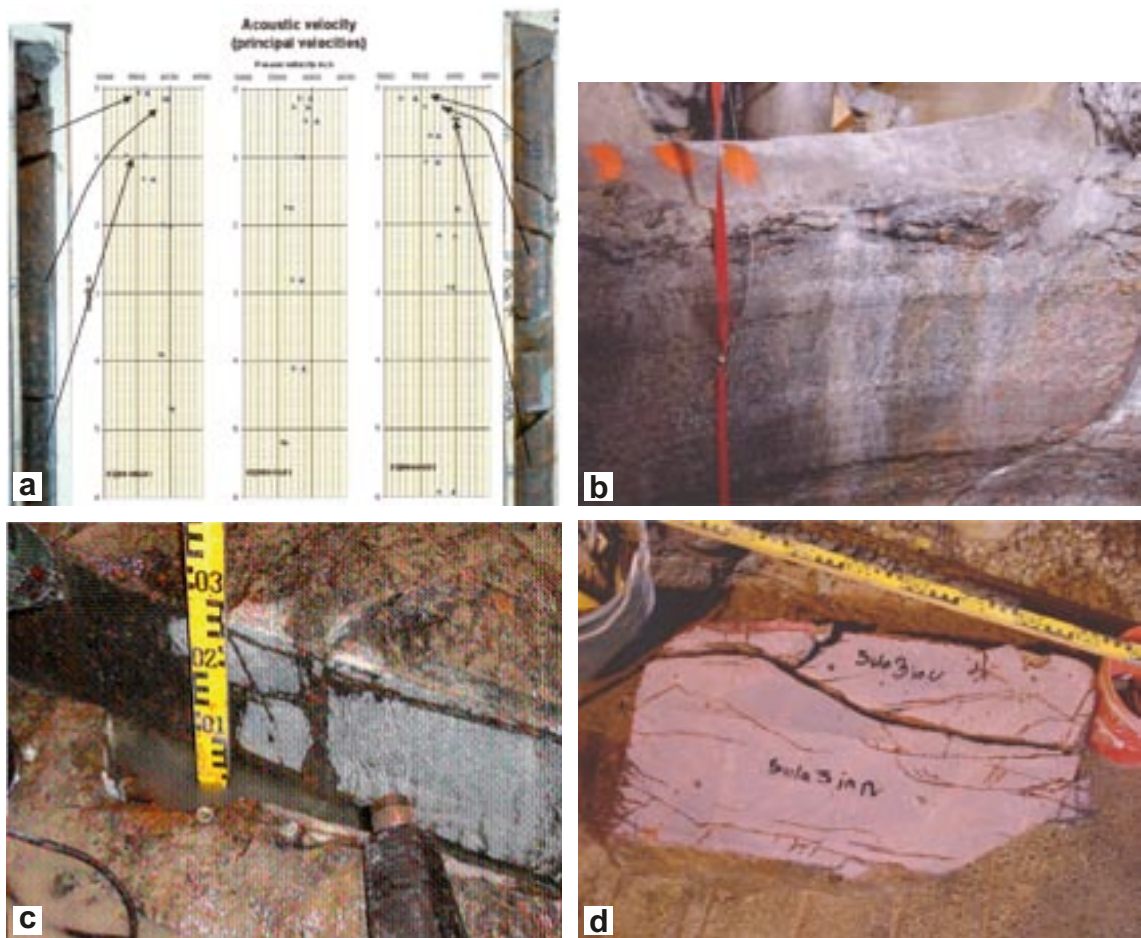
Kraven på deponeringstunnlar, med hänsyn till sprängskador i sidoberget, analyserades i SR-Can /12-26/. Resultatet visade att skador av den storleksordning som påvisades i Zedex-försöket /12-27/ och i Apse-tunneln /12-28/ i Äspölaboratoriet inte äventyrar slutförvarets funktion på lång sikt. Särskilt känsliga är dock förändringar i mekaniska och hydrauliska egenskaper i berget under sulan i deponeringstunneln, eftersom den zonen står i kontakt med deponeringshålet. Därtill kommer krav och önskemål på kvaliteten under deponering och förslutning för att möjliggöra god framkomlighet för deponeringsmaskinen och tillräcklig jämnhet vid placering av återfyllningens bottenblock. I realiteten är önskemålet en slät och jämn yta med endast en svag sidolutning. Lutningen i längdled styrs av önskan om självdränering, vilket betyder konventionella 1:100 till 1:50 uppåt från transport-tunneln räknat.

Från erfarenheterna i Apse-tunneln drar vi slutsatsen att vi lättast uppfyller kraven på minimering av skadezonen i tunnelbotten genom att dela på tunnelsektionen i en takort och en pall i stället för att spränga ut hela arean i ett steg. Takorten drivs först. Tekniken för drivning av denna skiljer sig inte från den tidigare beskrivna tekniken för försiktig borrhning och sprängning. Taket förstärks innan pallen bryts. Om den sprängstörda zonen i sulan som mest blir 0,8 meter djup, bör den kvarlämnade pallen ha minst den tjockleken.

Erfarenheter och resultat från Apse-projektet har sammanställts och analyserats. Projektet omfattade drivning av en cirka 70 meter lång tunnel i Äspölaboratoriet på 450 meters djup. Till följd av höga krav på skonsam sprängning blev drivningen speciell. Tunneln drevs för att vi skulle kunna studera bergets stabilitet i en pelare mellan två vertikalt borrhade hål, 1,8 meter i diameter och 6 meter djupa /12-29/. Vi ville ha höga spänningskoncentrationer i området mellan hålen och därför utformades tunneln med hög tvärsnitt och en halvcirkel formad botten. Hålen i tunneln laddades med patronerat sprängämne och initierades huvudsakligen med Nonel. För att undersöka om skadezonen kunde reduceras ytterligare utformades de tre sista tunnelsalvorna för initiering med elektroniska sprängkapslar. Borrhningsprecisionen var mycket bra och var en förutsättning för att den skonsamma sprängningen lyckades. Figur 12-4 visar några resultat från de undersökningar som gjordes av skador i berget.

I Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forsknings (SveBeFo) regi har störda zonens utbredning studerats och i Onkalo finns erfarenhet från praktisk rampdrivning med borrhning och sprängning /12-25/.

Utvärderingen av sprängskador från Apse-tunneln i Äspölaboratoriet /12-28/ visade att makroskopiska sprickor inducerats längs konturhålen. I en tvärsnitt till konturhålen tenderade de inducerade sprickor som nästan var parallella med väggarna att vara längre än de som inducerats i en stor vinkel till väggarna. Endast i undantagsfall hade de inducerade sprickorna från två närliggande konturhål propagerat så de möttes. Frekvensen inducerade sprickor minskade snabbt med avståndet från konturhålen. Den maximala sprickutbredningen i väggarna var cirka 0,3 meter för sprängning med Nonel respektive 0,2 meter för sprängning med elektroniska sprängkapslar. Det förra resultatet överensstämde med tidigare resultat från Zedex /12-27/ där också Nonel användes. De makroskopiska sprickorna i golvet var flacka, se figur 12-4. Detta bedöms bero på att tunneln togs ut med takort och pall, det vill säga bergvolymen närmast golvet sprängdes separat.



Figur 12-4. Observerad störd zon (EDZ) i Apse-tunneln. a) foton av borrhål och resultat av p-vågs-mätning i dessa, b) observerade skador i 1,8 meter diameter deponeringshål för Apse-försöket (en tunn betongkaka jämnar av bergytan), c) observerade sprickor i slits sågad i golvet i en borrhåla, och d) en skiva från golvet tvärs borrhålets riktning. I denna syns två stycken salvborrhål (överst i skivan).

Endast någon enstaka inducerad spricka hade direkt samband med konturhål. Det bedöms att tunnelgolvet's cirkulära tvärsnitt, som hade till avsikt att orsaka höga sekundärspänningar i golvet /12-29/ kan ha orsakat viss spänningsinducerad sprickbildning. Mätt i en längdsektion i väggen över två salvor kunde vi konstatera att de makroskopiska sprickorna som induceras längs konturhålen inte var kontinuerliga över gränsen till nästa sprängsalva. I stället observerades korta makroskopiska sprickor i stor vinkel till tunneln, troligen sub-parallella med tunnelns front. Att spränginducerade sprickor inte är kontinuerliga längs flera salvor förklaras av att borgeometrin medför en större diskontinuitet mellan borrhålen än djupet på de spränginducerade sprickorna. Påverkan av sprängning och spänningsomlagring leder även till mikroskopiska sprickor, troligen i storleksordning inom och mellan mineralkorn. Dessa är inte observerbara utan mikroskop, men förekomst indikeras via seismisk gånghastighet. I Apse-tunneln observerades reducerad p-vågshastighet ner till 0,4–0,5 meter under golvet, se figur 12-4. Hydrauliska egenskaper i relevant skala har inte bestämts i EDZ påverkad av makro- och mikroskopiska sprickor, men känslighetsanalys för deras möjliga påverkan gjordes i SR-Can.

För att uppfylla kvalitetskraven beträffande tunnarnas verkliga kontur, jämfört med den teoretiska konturen, samt begränsa påverkan på närzonsberget är det av yttersta vikt att ha:

- God precision vid borrhålets avsalvning, så att sprängämnet kommer så nära avsedd plats i salvan som möjligt. För att uppnå detta utvecklas ett system med högre precision än dagens rikt- och positioneringssystem.

- God kontroll vid laddningen av de olika hålen, så att sprängverkan blir den avsedda. Detta är en fråga om att hålla rätt på mängder som laddas i respektive hål.
- God kontroll över initieringen av salvan, så att sprängningen går som planerat, med tanke på skadeverkan på konturen orsakade av vibrationer. Elektroniska sprängkapslar har en mycket god precision och hög potential för att reducera sprickbildning i kvarstående berg. Dock behöver dessa göras mer användarvänliga.
- Mätbara krav på de olika parametrar ovan som tillsammans bidrar till att minimera EDZ. Indirekta parametrar såsom borrtolerans och god kontroll vid laddningen bedöms ha stor betydelse för att kontrollera utvecklingen av EDZ, även om dessa är indirekta parametrar. Därutöver erfordras verifierande observationer av sprängskadezonens djup, men detta kan bara bli i form av punktobservationer. Studier av geofysiska metoder för att indirekt uppskatta djupet av EDZ är ytterligare en möjlig metod.
- God kännedom om störda zonen hydrauliska egenskaper. Låga hydrauliska konduktiviteter är mycket svåra att mäta in situ. Vi bedömer ändå att det är viktigt att vi bekräftar vårt kunnande om den störda zonen utbredning, i framför allt deponeringstunnlar och deponeringshål, med fältobservationer av zonen hydrauliska egenskaper. Mätningar i laboratorium planeras på mindre bergprover från tunnelns periferi. Möjligheten att använda gas, som har betydligt snabbare transporthastighet, undersöks med avseende på relevansen i tolkning av mätta värden i hydrauliska termer. Metoden med ytmanschetter undersöks med avseende på mätning av utsågade block eller bergytter.

SKB har inte för avsikt att studera TBM-borrning för berguttag för deponeringstunnlar under pågående projekteringsskede, D2, utan endast att studera teknik för borrning och sprängning.

Vår uppfattning kvarstår att schakt för ventilation och hissar bör tillredas med stigortsborrning, av praktiska och ekonomiska skäl. Liten påverkan på sidoväggar är en bonus. I fråga om brytning av deponeringshål står SKB fast vid uppfattningen att tillreda dessa mekaniskt med omvänd stigortsborrning som referensalternativ.

Program

SKB kommer att studera teknik för borrning och sprängning under pågående projekteringsskede D2. Genom samverkan i olika branschorganisationer fördjupar SKB kunskapen om hur man kan bygga tunnlar med skonsam påverkan på närzonsberget:

- Emulsionssprängämne (Site Sensitized Emulsion – SSE) vinner allt större användning inom gruv- och anläggningsindustrin. Detta sprängämne har flera fördelar. En uppenbar fördel för stegvis utbyggnad parallellt med driften av slutförvaret är att SSE inte är aktivt förrän det blandas, normalt vid stuf där det ska användas. Därmed behöver inte krav som är relaterade till förvaring och transport av explosiva ämnen beaktas. Genom att förgasa emulsionen mer eller mindre kan varierande densitet och därmed laddningskoncentration erhållas. Tillämpningen av SSE-sprängämnen är dock inte helt problemfri i dag.
- Swedish Blasting Research Centre (Swebrec) är ett kompetenscentrum vid Luleå Tekniska Universitet. De bedriver bland annat forskning kring SSE-sprängämnens påverkan på skadezon i ett samverkansprojekt mellan tillverkare, byggföretag och entreprenörer. Målet är att få fram riktlinjer för hur man bedömer sprängskadezonen utifrån olika laddningskoncentrationer med SSE-sprängämne. SKB deltar i denna branschforskning.
- Nordic Rock Tech Centre (RTC), vars störste ägare är Stiftelsen MITU (Mineralindustrins teknikutveckling) med gruvföretagen LKAB, New Boliden och Lundin Mining som grundare. RTC driver bland annat projektet ”Faster and better tunnel drifting” på uppdrag av främst gruvföretag och entreprenörer. SKB deltar i detta arbete, bland annat för att få praktisk erfarenhet av kvalitetsarbete i samband med bergarbeten, vilket vi anser är en viktig aspekt i att erhålla en minimal sprängskadezon.

Preliminära studier har även gjorts av lämpliga borrh- och sprängplaner för att begränsa skadezonen i berget. Vi anser att vi kan ligga innanför de värden som eventuellt skulle kunna påverka den långsiktiga säkerheten för slutförvaret. SKB har utöver ovan nämnda projekt inblick i Posivas erfarenheter från bygget av Onkalo. Där utvecklas bland annat kunskap om hur man optimerar en modern borrhutrustning för att möta kvalitetskraven vid borrhning. SKB har för avsikt att följa upp erfarenheterna av berguttaget i Onkalo och placera en representant på plats. Bland annat etablerar Posiva där ett program för kontroll av störda zonen /12-25/. Erfarenheter och resultat från experiment och tester, som genomförs i Onkalo, kommer att komplettera programmen för utvecklingsverksamheten i Äspölaboratoriet.

Under bygget av slutförvaret kommer bergets faktiska egenskaper och beteende att vara fullständigt kända först när berguttaget genomförts. För att hantera den osäkerhet i platsförutsättningarna som detta innebär behövs en systematisk arbetsmetodik, vilket beskrivs i avsnitt 6.3 i del II. Eurocode-standard för geotechnical design /12-30/ ska gälla i Sverige från och med 2009. Inom branschorganet SveBeFo pågår ett projekt om tillämpningen av den så kallade observationsmetoden – en av de dimensioneringsmetoder som kan bli aktuell att tillämpa vid projektering och bygge av förvarets berganläggningar. SKB följer detta arbete och har i tillämplig grad introducerat detta i projekteringsförutsättningarna för projektering skede D2.

Den sprängskadade zonen (EDZ) hydrauliska egenskaper har undersökts i flera projekt tidigare och är i dag en deluppgift i det internationella samverkansprojektet Decovalex. Fokus ligger på att förstå kopplingen mellan den mekaniska störningen och förändringen i hydraulisk konduktivitet i såväl radiell som axiell riktning i förhållande till tunneln. Eftersom varje salva har en svag förladdning i yttre delen av borrhålen blir zonen intermittent längs tunneln. Men zonen kan stå i radiell förbindelse med sprickor som har hydraulisk betydelse för slutförvarets funktion. Framför allt är zonen i sulan ett betydelsefullt område. Kunskapen från Decovalex kommer att användas vid utformning av fältförsök i zoner med olika grad av sprängstörning i Äspölaboratoriet, även den zon som utbildas vid ett försiktigt uttag av bottenpallen i deponeringstunnlar.

Under denna Fud-period är också ambitionen att utforma och genomföra ett storskaligt mätförsök på den störda zonen runt en sprängd tunnel i berg med realistisk bergspänningsituation och realistiska geohydrauliska förhållanden.

SKB kommer att behöva tillgång till ytterligare tunnlar i Äspölaboratoriet för att genomföra olika typer av experiment och demonstrationer. Vår avsikt är att på lämpligt sätt utnyttja byggandet av dessa för att demonstrera tänkta borrh- och sprängplaner och därigenom praktiskt kunna verifiera att önskad kvalitet uppnås. Planen är att dessa tunnlar ska ha samma dimensioner som de framtida deponeringstunnlarna och att programmen för att genomföra bergarbetet ska utgöra preliminära program för motsvarande arbeten i slutförvaret.

Planen på att prova ut tätningsteknik i en tunnel i Äspölaboratoriet kommer att ge möjlighet till att testa valda delar av de aspekter som för närvarande anses kvalitetskritiska för god konturhållning och minimal EDZ. Efter utvärdering av de erfarenheterna avser SKB göra ytterligare en ortdrivning i Äspölaboratoriet för att testa en helhet i kvalitetstänkande i ortdrivning innan bygget av slutförvaret påbörjas. Därtill kommer en särskild experimenttunnel att behövas för att utveckla sprängmedel och elektriska tändare.

För uttag av bottenpallen i deponeringstunneln har vi analyserat två metoder för försiktigt uttag: försiktig borrhning och sprängning samt linsågning. Båda metoderna kommer att provas i fälttester i Äspölaboratoriet. Vid borrhning och sprängning ställs stora krav på borrhprecision och uppföljning för att sulan ska bli slät. Avvikelse från den teoretiska profilen har betydelse och följs upp genom lasermätning av tunnlar. Linsågning av golvet och borttagning av pallen sker troligen i steg om cirka 50 meter. Efter uttransport av det lossgjorda berget kan nästa sågningsetapp genomföras tills hela golvet är sågat och pallen borttagen. Lintrissan löper i två hål på varsin sida av sulan.

För att etablera en effektiv och utvecklingsanpassad verksamhet ämnar SKB organisera en grupp vid Äspölaboratoriet som specialiserar sig på ortdrivning med injektering.

12.6 Bergförstärkning

De förstärkningsmetoder som i huvudsak kommer att användas är konventionella förstärknings-element, såsom bergbultar, sprutbetong och nät. Bergförstärkningen kommer att lämnas kvar när förvaret försluts för att återfyllning ska kunna göras under säkrade bergförhållanden. Strategin för bergförstärkning bygger på principer enligt observationsmetoden, se avsnitt 6.3.3 i del II.

Berganläggningens beständighet under bygg- och driftskedena styrs bland annat av den tekniska livslängden hos anläggningens olika delar. Behovet av bergförstärkning utgör en del av de projekteringsunderlag som tas fram för undermarksdelen. Behovet beror bland annat på bergmassans egenskaper, laster i form av bergsspänningar och geometrin hos utrymmena. Behovet beror också på utrymmenas funktion och tekniska livslängd, liksom på underhålls- och miljökrav.

De övergripande kraven på bergförstärkning finns redovisade i projekteringsförutsättningarna. Livslängdskrav föreslås bli fem år för en deponeringstunnel, eftersom den ska återfyllas efter deponeringen. Detta motsvarar de krav som normalt ställs på temporära förstärkningar i anläggningsprojekt och gruvor. Livslängdskravet på resten av anläggningen har satts till 100 år. Det motsvarar det befintliga kravet på infrastruktur tunnlar /12-31/.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2004 framkom ett behov av att SKB redovisar vilka pH-värden som förväntas på bruk för bergbultar respektive sprutbetong för bergförstärkning. SKB:s målsättning är att dessa produkter ska vara av låg-pH-kvalitet som ger lakvatten med pH lägre än 11.

Nyvvunna kunskaper

De förstärkningsmetoder som är aktuella för slutförvaret är alla konventionella och kommersiella. Recepten på bruk för bergbult och sprutbetong, som uppfyller kraven på lågt pH, håller på att utvecklas.

I det pågående EU-projektet Esdred, som ingår i sjätte ramprogrammet, finns ett delprojekt som omfattar framtagning av recept för sprutbetong med lågt pH /12-32/.

SKB har – i samarbete med Cement- och Betonginstitutet (CBI) – vidareutvecklat ett recept på sprutbetong. Receptet togs ursprungligen fram av Enresa i Spanien. Det vidareutvecklade receptet har testats i ett pilotförsök i ett betonglaboratorium i Älvkarleby och dessutom har det under 2006 använts vid ett mindre fältförsök i Äspölaboratoriet /12-33/.

Förstärkningsbehoven på de båda kandidatplatserna har studerats i samband med projekteringen (skede D1). En slutsats är att tillräcklig stadga och stabilitet kan uppnås under de flesta förhållanden med tämligen enkla åtgärder, såsom bult och ytförstärkning med sprutbetong eller nät. Endast vid passage genom deformationszoner räknar vi med att mer omfattande förstärkning kan behövas.

Betong med lågt pH kommer att, förutom i bultbruk och sprutbetong, användas för att konstruera pluggar till deponeringstunnlarna, fundament i botten av deponeringshålen och preliminärt även i vägbeläggningen i slutförvarsanläggningens tunnelsystem.

Program

Framtagning av recept på bruk för bergbult, sprutbetong och vägbeläggning som uppfyller kraven på lågt pH fortsätter. Lämpliga bruk kommer att provas i Äspölaboratoriet.

Vi kommer också att studera och prova ut hur modern nätningsteknik kan användas med syftet att kunna minska den totala mängden sprutbetong. Fältförsök kommer att göras i Äspölaboratoriet, i Onkalo och i andra anläggningar, där vi kan etablera ett samarbete.

12.7 Borrning av deponeringshål

Viktiga krav på det vertikala deponeringshålet är att raket och diameter kan hållas inom snäva toleranser. Detta har betydelse för att slutdensiteten hos bufferten ska hålla sig inom givna ramar. Dessutom ska skador på det omgivande berget minimeras och föroreningar i deponeringshålet undvikas. Botten på deponeringshålet bör vara så horisontell som möjligt. Det underlättar konstruktionen av bottenplattan i deponeringshålet, eftersom denna måste vara helt horisontell. Om en horisontell botten i deponeringshålet inte kan åstadkommas, kommer ett större radiellt utrymme mellan kapsel och buffertringarna att krävas.

12.7.1 Borrning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

De metoder för att borra deponeringshål som bedöms vara möjliga är schaktborrning eller borrning av pilohål med efterföljande upprymningsborrning.

Fullborrning av deponeringshål har verifierat den störda zonens utbredning som funktion av olika borrrparametrar /12-34/.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Under hösten 2006 genomfördes en förstudie som behandlar möjliga tekniker för berguttag för deponeringshål. Följande metoder ansågs som möjliga:

- Omvänd stigortsborrning
- Schaktborrningsmaskin eller TBM utrustning
- Vattenkluster
- Luftkluster
- Vattenjet
- Kärnbörning

Berguttag för deponeringshål genom borrning och sprängning respektive sömborrning avfördes, eftersom dessa metoder inte kan uppfylla kraven för deponeringshålen.

Resultatet av förstudien har lett till att vi har valt omvänd stigortsborrning som referensmetod. En preliminär konstruktion (basic design) av en maskin som uppfyller slutförvarets krav har påbörjats. Vi har erfarenheter av denna teknik från provborrning av tre deponeringshål i Posivas undersöknings-tunnel för VLJ-förvaret för låg- och medelaktivt avfall i Olkiluoto /12-35/ och från borrning av långa horisontella deponeringstunnlar för KBS-3H i Äspölaboratoriet /12-36/.

De faktorer som gjorde att SKB valde omvänd stigortsborrning är att utrustningen bäst kan uppfylla SKB:s krav på:

- säkerhet, geometri och liten miljöpåverkan,
- effektivitet och tålighet,
- etablerad teknologi, som leder till minskade utvecklingskostnader och kortare utvecklingstider samt effektivare drift och underhåll.

Frågan om spjälkning av deponeringshålens väggar berör flera ämnesområden, även borrning av deponeringshålen. Borrsekvensen kan både förvärra och förbättra situationen beroende på hur arbetet drivs. Utformningen av bormaskinen beror således på om det finns risk för spjälkning och frågan måste bevakas även i detta avseende.

Program

När utformningen av maskinen för omvänd stigortsborrning av deponeringshål är avslutad kommer vi att göra en utvärdering av maskinens prestanda och totala effektivitet. Planen är att sedan gå vidare och tillverka en prototyputrustning, se figur 12-5.



Figur 12-5. Borrning av deponeringshål med omvänd stigortsborrning i Olkiluoto genomförd i ett samarbetsprojekt mellan SKB och Posiva.

Utveckling av alternativen vattenjet och kärnborrning kommer att följas upp under de närmaste åren och vi kommer eventuellt att själva initiera begränsade tester.

12.7.2 Uttag av avfasning i deponeringshålet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Redovisningen i Fud-program 2004 omfattade inte uttag av en avfasning i deponeringshålet.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Den aktuella referensutformningen av deponeringsmaskinen bygger på att den nedre delen av strålskyddet förs ner i deponeringshålet när kapseln deponeras. Tunnelhöjden kan därmed begränsas, jämfört med om strålskyddet ställs ovanför deponeringshålet. Tipp rörelsen ner i deponeringshålet kan bara ske om en avfasning tas ut i deponeringshålets övre del. Avfasningen måste vara 1,1 meter djup och 1,6 meter bred. Deponeringsmaskinens funktion vid deponering bygger på en tippande, samtidig rörelse framåt och neråt.

Två alternativa tekniker för uttaget av avfasningen är linsågning och vattenjet. Av dessa bedömer vi att linsågning har störst potential. I demonstrationstunneln på 420 meters djup i Äspölaboratoriet gjordes avfasningar i hålen där SKB:s rälsbundna deponeringsmaskin deponerade kapslar. Dessa sömborrades ut.

Program

Lämplig teknik för uttag av avfasningen kommer att provas ut i Äspölaboratoriet.

13 Buffertlinjen

Buffertlinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av den buffert, i form av ringar och block av högkompakterad bentonit, som omger kapseln i deponeringshålen. I linjen ingår pressning av bentonitblock och -ringar, mellanlagring, inredning av deponeringshålen och själva installationen. Förutom ringar och block kan bentonit i form av pelletar eller granuler komma att fyllas i de spalter som bildas mot bergväggen i deponeringshålen.

Av färgsättningen av buffertlinjen framgår för vilka områden som det finns känd och beprövad teknik som kan appliceras på slutförvaret samt för vilka det krävs teknikutveckling, se figur 13-1. Figuren beskriver SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag. För de områden som markerats med grå eller grön färg förutsätts normala projekteringsinsatser räcka för att specificera konstruktion och genomförande av de åtgärder som behövs. I något fall kan verifierande tester vara motiverade. För de områden som markerats med gul eller röd färg behövs teknikutveckling. För flera av de gulmarkerade områdena har studier genomförts, men SKB anser att ytterligare insatser för vidareutveckling eller optimering är motiverade.

Brytning av bentonit	Känd och beprövad tillämpning i dag
Tillverkning/konditionering hos leverantör	Känd och beprövad teknik som kan appliceras
Mottagning och mellanlagring	Känd och provad teknik som kan appliceras efter tester
Krossning och siktning av granuler	Teknik som inte är känd eller tillräckligt utprovad i den tilltänkta användningen
Malning/torkning	
Mellanlagring	
Konditionering	
Pressning av pelletar	
Pressning av ringar och block	
Mellanlagring av buffert	
Inredning av deponeringshål	
Installation av dränage och temporärt buffertskydd	
Installation av block och ringar	
Förslutning av buffertskydd	
Övervakning före återfyllning	
Installation av pelletar/granuler	

Figur 13-1. Buffertlinjen – SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag.

13.1 Nuläge

Bentonittillgångarna i världen är mycket stora. Flera av de aktörer, som finns på marknaden i dag kan leverera en produkt som uppfyller SKB:s krav på materialet i bufferten.

Teknik och metoder för att krossa och sikta bentonit i form av granuler är känd och beprövad teknik, som används i världens bentonitindustrier i dag. Detta gäller även teknik för att mala, torka och blanda bentoniten, så att den uppnår avsedd vattenhalt (konditionering).

SKB har provat två metoder för att pressa blocken och ringarna: enaxlig pressning och isostatisk pressning. Båda teknikerna måste vidareutvecklas innan de kan användas vid driften av slutförvarsanläggningen. Teknik för att pressa pelletar finns i kommersiell skala, men måste anpassas för att möta de behov som finns i slutförvaret.

Mellanlagringen av buffertmaterial ska ske under kontrollerade förhållanden för att egenskaperna, främst vattenhalten, ska kunna bibehållas. Det är också viktigt att utreda hur bufferten ska skyddas för att bibehålla sina egenskaper efter installationen i deponeringshålet fram tills återfyllningen av deponeringsstunneln sker. Metoden för att installera bufferten behöver även den utprovas och finjusteras.

13.2 Krav och förutsättningar

Buffertens huvuduppgift är att skydda kapseln och att hindra vattenflödet, samt fördröja transporten av radionuklider från en otät kapsel till berget. Bufferten får heller inte ha några egenskaper som påverkar de andra barriärerna negativt. Kraven på de metoder och den utrustning som behövs för att den installerade bufferten ska kunna uppfylla den långsiktiga funktionen samt för att möjliggöra hantering och installation är att:

- Buffertblocken ska pressas till specificerad geometri, vatteninnehåll och täthet.
- Buffertblocken får endast innehålla sprickor och andra inre defekter, som kan accepteras med hänsyn till de lyft och annan hantering som buffertblocken utsätts för under drift.
- Installationsmetoden och utrustningen ska resultera i en vertikal stapel av block, med tillräckligt stort utrymme i mitten för att deponera en kapsel.
- Buffertens egenskaper ska hållas inom specificerade gränser, oavsett vatteninflödet i deponeringshålet fram till dess deponeringsorten återfyllts förbi deponeringshålet.
- Spalten mellan buffertblock och berg ska kunna rymma slangar för dränage samt ett eventuellt buffertskydd.
- Buffertskyddet ska kunna förslutas efter deponeringen av kapseln och inplaceringen av bentonitbufferten. En diffusionstät spärr ska då finnas runt det deponerade buffert-kapselpaketet.
- Den relativa luftfuktigheten innanför buffertskyddet ska kunna mätas kontinuerligt i representativa punkter. Acceptabla avbrottstider i mätserierna ska specificeras.
- Buffertskyddet och dränageledningarna ska kunna tas bort på ett säkert sätt.

Om spalten fylls med pelletar eller granuler ska dessa uppfylla följande krav:

- Pelletarna ska uppfylla en i förväg specificerad form och täthet och granulerna en i förväg specificerad storleksfördelning.
- Pelletar och granuler ska fyllas i spalten mellan buffertblock och berg i en sådan mängd att den totala specificerade mängden bentonit i deponeringshålet blir tillräcklig för att klara kraven på densitet och svälltryck.

I kapitel 24 i del IV redovisas de processer som kan påverka bufferten på lång sikt och de egenskaper bufferten ska ha i sitt initialtillstånd för att på bästa sätt uppfylla funktionen på lång sikt. För att på förhand kunna belägga att den tekniska utvecklingen leder till att de metoder och maskiner vi tar fram verkligen uppfyller de ställda kraven, kommer vi att gå igenom och sammanställa de kontroller och den dokumentation som under tillverkning, mellanlagring och installation ska säkerställa kvaliteten.

Teknikutveckling inriktas i dagsläget på ett initialtillstånd med en buffert runt kapseln som består av en specificerad mängd bentonit med en specificerad homogenitet i deponeringshålet. Förutom bentonitens kemiska egenskaper, som är en given förutsättning i teknikutvecklingen, är täthet hos torr substans och vattenkvot viktiga egenskaper. Kvaliteten hos pelletar, granuler och stora block karakteriseras av dessa. Andra indikator är storleken på pelletar och siktcurvan hos granuler.

13.3 Tillverkning av buffert

Tillverkningen av bufferten består i huvudsak av två aktiviteter: pressning av ringar och block samt tillverkning av pelletar och granuler. Aktiviteterna beskrivs i avsnitt 13.3.1 respektive 13.3.2.

13.3.1 Pressning av ringar och block

SKB har provat två metoder för att pressa bentonitblock och -ringar: enaxlig pressning och isostatisk pressning. Block och ringar till nio deponeringshål i naturlig storlek har tillverkats av natriumbentonit (MX-80) med enaxlig pressning. Dessa har sedan använts i Återtagsförsöket, Prototypförvaret /13-1/ och Lasgitförsöket i Äspölaboratoriet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Sverige finns ingen isostatpress där block och ringar i full skala kan tillverkas. Tolv bentonitblock i skala 1:4 pressades i en befintlig press hos företaget Ifö Ceramics under år 2000 /13-2/. Resultaten visade att tekniken bör vara tillämplig även i en större skala. SKB konstaterade att tillverkning av bufferten genom isostatisk pressning tillsammans med processen för hanteringen kommer att utredas vidare.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att SKB behöver utveckla teknik och rutiner för att tillverka buffertblock, till exempel testa referensmetoden för kompaktering i full skala. Vidare bör det buffertkoncept som ska ingå i kommande ansökningar prioriteras.

Kasam ansåg att SKB bör redovisa hur man kan säkerställa att buffertens densitet kan upprätthållas på en tillräckligt hög nivå.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Tillverkningen av block och ringar har inte prioriterats av SKB under den innevarande perioden. Ett antal mindre utredningar har dock gjorts. Bland annat har block av alternativa buffertmaterial i liten skala tillverkats till ett fältförsök i Äspölaboratoriet.

Genomförda analyser av densiteten i den vattenmättade bufferten i de sex deponeringshålen i Prototypförvaret har visat att den önskade buffertdensiteten har uppnåtts. Analyserna visade också att variationen i densitet är liten inom och mellan deponeringshålen /13-3/. Detta innebär att vi har visat att vi kan tillverka och installera buffertkomponenter.

Stora sammansatta block, med ring och botten i en enhet, skulle kunna vara ett alternativ. Risken är dock stor att en sådan utformning medför problem med uppsprickning och sönderfall under bevätning och under torkning efter deponering. Att använda sådana block innebär dessutom att medeldensiteten och svälltrycket blir högre i botten än runt kapseln, eftersom den skillnad i densitet mellan ringar och block som tillämpats vid tillverkning för försöken i Äspölaboratoriet, inte kan åstadkommas vid tillverkning av ett sammansatt block.

Program

SKB har inte valt referensmetod för att tillverka block och ringar. Detta innebär att både enaxlig och isostatisk pressning av bentonitblock och ringar kommer att vidareutvecklas parallellt. Utvecklingen sker i samarbete med Posiva.

Det första övergripande målet är att få fram ett underlag för att kunna utvärdera och jämföra de två teknikernas potential. Resultaten från utredningarna kommer att användas för att motivera valet av den metod som kommer att beskrivas i ansökan för slutförvaret enligt kärntekniklagen och i ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet.

Det planerade utvecklingsarbetet för isostatisk pressning kan indelas i följande delmoment:

- Pressa block i skala 1:4 i en befintlig press, till exempel i den hos Ifö Ceramics i Bromölla. Dessutom kommer möjligheten att pressa ännu större block, nära full skala, i någon press i eller utanför Europa att undersökas.
- Utredda behovet av och utveckla teknik för att bearbeta blocken för att de ska få önskade dimensioner.
- Testa, i en liten befintlig press, hur konditioneringen av bentoniten påverkar kvaliteten på blocken.

Det planerade utvecklingsarbetet för enaxlig pressning kan indelas i följande delmoment:

- Utveckla metoden så att behovet av smörjmedel minimeras.
- Förbättra blockens geometri, det vill säga eliminera eller minska den koniska form som blocken får vid pressning i dag.
- Utveckla tekniken för pressningen så att blocken kan göras högre än de 50 centimeter höga block som har tillverkats hittills.

13.3.2 Tillverkning av pelletar och granuler

Metoder och teknik för att tillverka pelletar och granuler är kända och finns tillgängliga på den kommersiella marknaden. Pelletar pressas av finmald bentonit och får en jämn yta. Storleken blir samma hos alla pelletar som pressas med samma pressverktyg. Granulerna sikts ut vid krossning och malning av bentoniten. De är ojämna partiklar men deras partikelstorlek kan kombineras för att få en gynnsam storleksfördelning eller densitet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Tillverkning av pelletar eller granuler redovisades inte i Fud-program 2004.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Spalten mellan berg och buffertblock kan komma att fyllas med pelletar eller granuler av bentonit. Ingen särskild teknikutveckling har bedrivits under den aktuella perioden.

Program

Fram till ansökningarna för slutförvaret enligt kärntekniklagen och för slutförvarssystemet enligt miljöbalken kommer de båda produkternas för- och nackdelar att provas genom tester i Bentonitlaboratoriet. Olika partikelstorleksfördelningar för granuler och olika storlekar på pelletar ska utvärderas.

13.4 Mellanlagring

De bentonitblock och -ringar som tillverkas måste kunna mellanlagras på ett sådant sätt att deras egenskaper bibehålls. Detta gäller även pelletar och granuler. Bentonit tar upp vatten, så att den sväller, i fuktig luft och torkar i torr luft. För varje vattenhalt i bentonit finns ett jämviktsvärde för den relativa fuktigheten i den omgivande luften. Mellanlagringen kan till exempel ske i hermetiskt tillslutna rum där detta utnyttjas. Vid mellanlagringen av blocken till de olika försöken i Äspölaboratoriet användes hermetiskt tillslutna stålbehållare, som även fungerade som transport-skydd.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Ingen redovisning presenterades av mellanlagring av buffertblock och -ringar i Fud-program 2004.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen verksamhet har pågått under perioden.

Program

Inför valet av metod för mellanlagring kommer laborietester att genomföras. Syftet med dessa är att bestämma de olika buffertprodukternas jämviktsvärden med omgivande atmosfär. Dessutom kommer olika metoder för att innesluta buffertprodukterna att studeras.

13.5 Inredning av deponeringshål

Efter att deponeringshålet har borrats och bergkarakteriseringen klarats av, behöver viss inredning finnas på plats innan det första bentonitblocket kan installeras. Inredningen omfattar en horisontell botten i deponeringshålet, utrustning för att ta hand om inläckande vatten och ett temporärt skydd runt bufferten för att förhindra att den sväller innan återfyllningen i deponeringstunneln installeras.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Ingen redovisning av inredningen av deponeringshålen presenterades i Fud-program 2004.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

I dagsläget består inredningen i deponeringshålet av:

- En horisontell bottenplatta av låg-pH-betong och en diffusionsspärr, till exempel en kopparplåt.
- En pumpgrop för att samla upp inläckande vatten.
- En slang för att suga upp dräneringsvatten.
- Ett buffertskydd som fästes runt bottenplattan. Skyddet fästs så att det går att ta upp det uppifrån tunneln vid ett senare tillfälle, innan tunneln ska återfyllas. Buffertskyddet ska gå att försluta temporärt.

Denna typ av inredning användes i deponeringshålen i Återtagningsförsöket och Prototypföret i Äspölaboratoriet /13-4, 13-5, 13-6/.

Program

Under den kommande perioden ska vi undersöka hur stort vatteninflöde till deponeringshålen som kan hanteras, utan att vi måste använda tekniska lösningar så som dränage och buffertskydd. Dessutom ska vi studera hur stora vatteninflöden som kan hanteras med hjälp av tekniska lösningar.

Olika tillfälliga installationer för att skydda bentoniten från inläckande vatten och från den höga luftfuktigheten i deponeringshålet kommer att studeras, jämföras och rangordnas. I samband med utvecklingen och provningen av olika buffertskydd undersöks också förslutningen av skyddet. Syftet är att få mer information om dess beständighet vid ökande temperatur och i olika klimatsituationer.

Bentonitlaboratoriet kommer att användas för de grundläggande tester som behöver göras. Innan den valda lösningen används i slutföret ska den först demonstreras i en realistisk underjordsmiljö i Äspölaboratoriet.

13.6 Installation av block och ringar

Innan kapseln placeras i deponeringshålet ska bufferten, som består av högkompakterad bentonit i form av block och ringar, vara på plats. För att placera in bufferten krävs en utrustning som klarar av att lägga ned och även, om så behövs, ta upp bentonitringar och bentonitblock ur deponeringshålen. Utrustningen består i princip av en bockkran och ett lyftverktyg. Lyftverktyget är försett med ett positioneringssystem för att blocken ska hamna i exakt rätt position i deponeringshålet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB konstaterade i Fud-program 2004 att den utrustning i form av lyftverktyg och bockkran, som använts för att placera in block och ringar i tester i Äspölaboratoriet /13-5, 13-6/, var bra och har goda utvecklingsmöjligheter.

SSI påpekade att SKB, inför provdriften, behöver kunna visa att man kan genomföra samtliga moment i deponeringen under realistiska förhållanden och med de maskiner och rutiner som ska användas för rutinmässig drift.

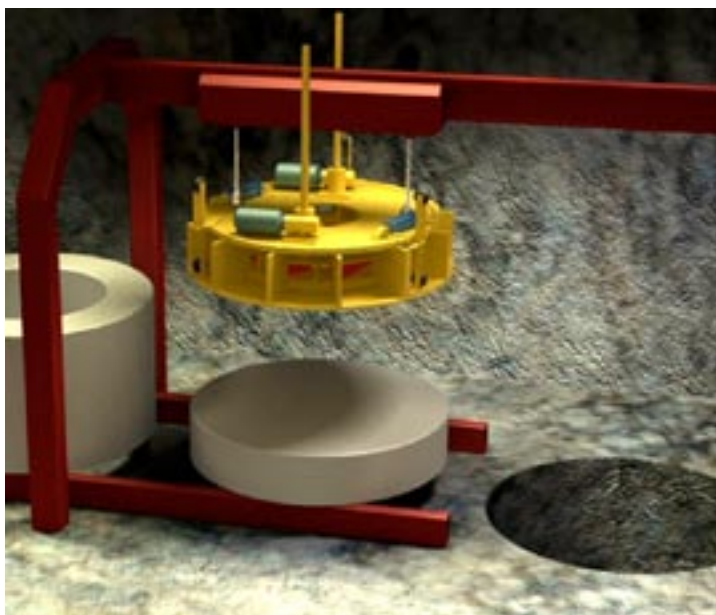
Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

I vidareutvecklingen av lyftverktyget och bockkranen för buffertinstallationen används som utgångspunkt numera de större block som SKB planerar att tillverka. En preliminär utformning för såväl verktyg som kran har tagits fram.

Program

Programmet för att installera bufferten omfattar tillverkning av utrustning samt tester och demonstration av metoden i Bentonitlaboratoriet och Äspölaboratoriet. De planerade demonstrationerna syftar till att bekräfta att den valda metoden och hanteringsutrustningen kommer att fungera som planerat. Programmet kommer att delvis genomföras i samarbete med Posiva.

I första hand utvecklas lyftverktyget. Ett nytt prototypverktyg kommer att vara klart 2008, se figur 13-2. Detta verktyg kommer inledningsvis att användas i Bentonitlaboratoriet.



Figur 13-2. Illustration av den prototyp av lyftverktyg som utvecklas för block och ringar.

I ett senare skede kommer prototypen för lyftverkyget att samprovas med en prototyp av en buffert-nedläggningsmaskin. Detta kan ske på 420 meters djup i de befintliga tunnarna i Äspölaboratoriet. SKB har planer på att bygga nya tunnlar på denna nivå. Om så sker kan demonstrationen förläggas dit. Tidsplanen för att bygga de nya tunnarna är inte fastställd, men preliminärt inleds utbyggnaden under 2008.

I programmet ingår även att ta fram en strålskärmsslucka, se figur 13-3. Luckan ska förhindra direktstrålning upp i deponeringstunneln efter det att kapseln har deponerats, men innan de översta bentonitblocken har lagts på plats. Behovet av strålskärmning efter det att all bentonitbuffert är installerad kommer att utredas. Först måste emellertid den tillåtna strålningsnivån från en kapsel specificeras och buffertens strålskärmande kapacitet mätas.

13.7 Installation av pelletar eller granuler

Buffertblocken innehåller så mycket bentonitlera att initialtillståndet (se avsnitt 24.1 i del IV) kan uppfyllas utan att någon kompletterande fyllning i deponeringshålen är nödvändig. I vissa fall finns det emellertid en risk för att temperaturhöjningen från kapseln ger upphov till spjälkning i bergväggen innan bufferten hunnit svälla ut. Följden blir att bergskivor rasar ner i spalten mellan buffertblock och bergvägg. Detta kan förhindras om spalten från början är helt utfylld med pelletar eller granuler.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

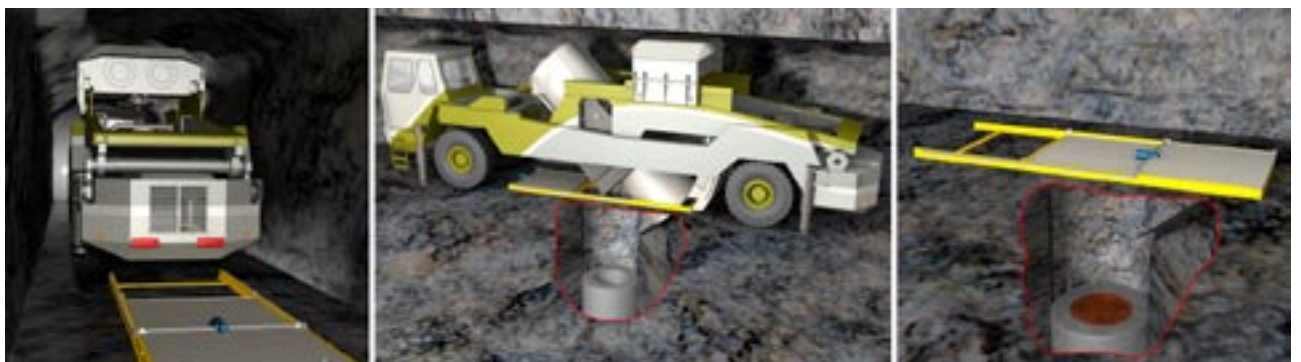
Installation av pelletar eller granuler mellan bentonitblocken och bergväggen i deponeringshålen diskuterades inte i Fud-program 2004.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Inga insatser har inriktats direkt på detta område under perioden. Kunskapen baseras på det goda resultatet från spaltfyllning med pelletar i Återtagningsförsöket, Temperatur Buffer Test och Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Kompletterande erfarenhet har sedan dess erhållits genom tester med inblåsning av pelletar vid återfyllning i Äspölaboratoriet.

Program

Installation av pelletar respektive granuler i deponeringshål kommer att vidareutvecklas och testas i full skala i Bentonitlaboratoriet. Målet är att utveckla metoder och utrustningar för installationen som gör att damningen kan minimeras och som leder till en hög och jämn fyllningsgrad i deponeringshålet. Hur olika förhållanden, så som till exempel vatteninflöde och risk för spjälkning i deponeringshålet före vattenmättnad, påverkar installationen kommer att utredas.



Figur 13-3. Strålskärmsslucka som förhindrar direktstrålning innan de översta bentonitblocken lagts på plats. Figuren visar strålskärmssluckan före, under och efter deponering.

14 Kapsellinjen

Kapsellinjen beskriver hur kapslarna, som det använda kärnbränslet ska kapslas in i, tillverkas, försluts, transporteras och deponeras. Till linjen hör dessutom aktiviteter som transporter av inkapslat bränsle samt hantering och deponering i slutförvaret. Här presenteras även teknikutvecklingsbehoven för två processteg i inkapslingsanläggningen som egentligen ingår i Bränslelinjen, torkning av bränsle samt mätning av resteffekt.

Av färgsättningen av kapsellinjen framgår för vilka områden som det finns känd och beprövad teknik som kan appliceras på slutförvaret samt för vilka det krävs teknikutveckling, se figur 14-1. Figuren beskriver SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag. För de områden som markerats med grå eller grön färg förutsätts normala projekteringsinsatser räcka för att specificera konstruktion och genomförande av de åtgärder som behövs. I något fall kan verifierande tester vara motiverade.



Figur 14-1. Kapsellinjen – SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag.

För de områden som markerats med gul eller röd färg behövs teknikutveckling. För flera av de gulmarkerade områdena har studier genomförts, men SKB anser att ytterligare insatser för vidareutveckling eller optimering är motiverade.

14.1 Nuläge

Arbetet med att få fram kapslar för slutförvaret har pågått under många år. Verksamheten drivs på bred front.

Via forskning ökar kunskaperna om olika processer i slutförvaret och de påkänningar som kapseln måste motstå, se avsnitt 23.2 i del IV. Information om belastningar på kapseln i slutförvarets hanteringssystem tillkommer när utveckling och projektering av detta successivt färdigställs. Kapseln ska uppfylla de specifikationer som härleds ur konstruktionsförutsättningarna. Olika provningar och analyser som ger underlag till specifikationerna för kapseln pågår. Aktuella områden är korrosionsprovning och kryppprovning.

Det grundläggande konceptet för kapseln förändras inte men detaljutformningen är föremål för olika studier. Ett exempel på detta är att för att underlätta deponeringen är det önskvärt, men inte nödvändigt, att kapselns botten är plan. Om detta är möjligt att åstadkomma studeras nu genom att tillverknings- och svetsförsök samt utvärdering av provbarheten genomförs. Ett annat exempel är att vissa deformationer kan uppstå av bränslekanalerna vid gjutning av PWR-insatser. Kanalstorleken kan komma att behöva justeras med anledning av detta.

Tillverkningsprocesserna hos olika leverantörer utvecklas successivt för att komponenterna ska uppfylla uppställda specifikationer. Flera alternativa och kompletterande metoder för tillverkning utvecklas. En bedömning har gjorts för varje komponent av vilken tillverkningsmetod som har kommit längst i utvecklingen och som bedöms ha förutsättningar för att innehålla kvalitetskraven i produktion (referensmetoder).

Som referensmetod för förslutning av kopparkapseln har SKB valt friction stir welding (FSW) /14-1/ och optimering av denna process pågår. Svetsarna har mycket goda mekaniska egenskaper och sannolikheten för att det finns diskontinuiteter i dem är liten. Svetsmaskinen i Kapsellaboratoriet har hög tillförlitlighet.

Oförstörande provning är ett viktigt redskap för utvärdering av materialstruktur och förekomst av diskontinuiteter. Tidigare har endast kapselns svetsar kunnat provas regelmässigt i Kapsellaboratoriet men numera kan även kapselkomponenterna – kopparrör, insats samt lock och botten provas. Arbete med optimering av provmetoderna och utvärdering av tillförlitligheten hos dessa pågår samtidigt som preliminära resultat från provning av kapselkomponenter börjar bli tillgängliga.

Metoderna för oförstörande provning (OFP) som tagits fram tillämpas som ett verktyg i utvecklingsarbetet. SKB har presenterat ett program för demonstrationer och den därtill kopplade prekvalificeringen /14-2/. Under 2007 sker enligt våra planer den första industriella demonstrationen av tillverkningsprocessen för BWR-insatser samt prekvalificering av gjutprocessen hos en av våra leverantörer.

I inkapslingsanläggningen ska det använda kärnbränslet torkas innan det kan placeras i kapseln. SKB har i ansökan om att uppföra inkapslingsanläggningen visat på att vakuomtorkning är en metod för bränsletorkning. I planeringen för kommande år ingår en studie av alternativa torkningsmetoder i syfte att effektivisera torkprocessen, främst avseende läckande bränsle.

För transporter av kapslarna från inkapslingsanläggningen till slutförvarsanläggningen behövs en specialutformad transportbehållare som, liksom alla andra transportbehållare som SKB använder, ska uppfylla reglerna i IAEA:s transportrekommendationer. SKB anlitar etablerade behållarkonstruktörer för att utforma och tillverka behållarna.

Utrustning och rutiner för hantering och deponering av kapslarna med använt kärnbränsle i slutförvarsanläggningen ska utformas så att stråldoser till personal begränsas och att den förslutna kapseln inte utsätts för påkänningar som påverkar dess egenskaper som barriär i slutförvaret. Utrustningen och rutinerna ska även utformas så att konsekvenser av missöden och avvikelser från det normala mildras. SKB kartlägger hela hanteringskedjan och de projekteringsarbeten som genomförs omfattar utformningen, och i vissa fall tillverkning av prototyper, av utrustning och fordon som krävs för att genomföra verksamheten.

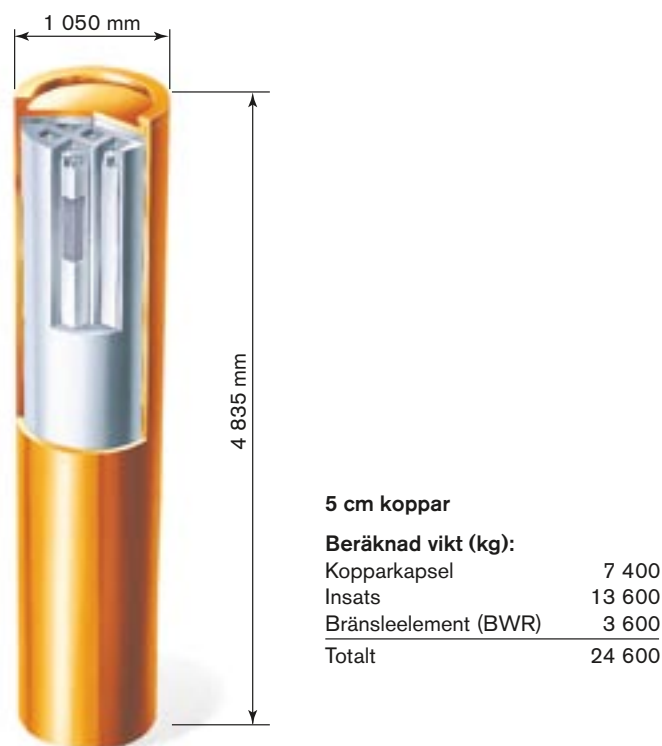
14.2 Krav på kapseln

I slutförvaret har kapseln till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen under mycket långa tidsperioder. SKB:s referensutformning för kapseln består av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. Kapseln har en diameter på drygt en meter och den är nästan fem meter lång, se figur 14-2.

Både utformningen av kapselns olika delar och valet av material i de olika komponenterna baseras på konstruktionsförutsättningarna för kapseln /14-3/. Med konstruktionsförutsättningar menas de övergripande krav som vi ställer på kapselns funktion. Dessa ligger i sin tur till grund för hur kapselns olika delar utformas i detalj.

I korthet innebär konstruktionsförutsättningarna följande:

- Kapseln ska innesluta och förhindra spridning av radioaktiva ämnen från det använda kärnbränslet.
- Kapseln ska motstå de korrosionsangrepp som förväntas i slutförvaret.
- Kapseln ska motstå de isostatiska belastningar som förväntas i slutförvaret under en glaciationscykel.
- Kapseln ska motstå de skjuvbelastningar som förväntas i slutförvaret.



Figur 14-2. Kapsel för använt kärnbränsle. Kapseln består av ett ytterhölje av koppar och en insats av segjärn. Insatsen på bilden är avsedd för BWR-element.

- Kapseln ska ha försumbar negativ termisk, kemisk och mekanisk inverkan på de andra barriärerna och på bränslet.
- Kapseln ska kunna transporteras, deponeras och i övrigt hanteras på ett säkert sätt.
- Kapseln ska vara baserad på beprövad eller väl utprovad teknik.
- Kapslar med specificerade egenskaper ska kunna tillverkas, förslutas och kontrolleras med hög tillförlitlighet i produktionen.
- Kapselns egenskaper ska gå att kontrollera mot specificerade acceptanskriterier.
- Kapseln ska kunna tillverkas, förslutas och kontrolleras i önskad takt.

Utrustning och rutiner för transporter, hantering och deponering av kapslar med använt kärnbränsle ska också utformas så att stråldoser till personal begränsas. Utrustningen och rutinerna ska även utformas så att konsekvenser av missöden och avvikelser från det normala mildras.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Vid sin granskning av Fud-program 2004 ansåg SKI att SKB snarast bör ta fram konstruktionsförutsättningar för kapseln och verifiera dessa i nästa planerade säkerhetsanalys 2006. Myndigheten saknade en klar och logisk koppling mellan de detaljerade konstruktionskraven för kapseln och kraven på långsiktig säkerhet. SKI påpekade i sin granskning att kraven på tillverkning och kontroll bör utformas från ett underlag av utredda händelser, konstruktionsförutsättningar, material- och miljödata, belastningsunderlag och hållfasthetsanalyser.

SKI hade även några materialtekniska invändningar. Bland annat saknar man en redovisning som motiverar att medelkornstorleken 360 mikrometer i koppar är vad som krävs. SKB utgick från en internationell standard för koppar men gav inget motiv eller referens till varför man har valt att följa den valda standarden, ansåg myndigheten. Det framgår inte heller om kraven på kornstorlek och föroreningsförekomst även gäller svetsen.

SKI hade även en rad detaljsynpunkter. Vid beräkning av kapselns hållfasthet måste lasterna tydligt anges och hänsyn tas till förhöjd temperatur. Acceptanskriteriet att minsta tillåtna koppartäckning är 1,5 centimeter är otydligt. Defektens andra dimensioner, såsom längd och bredd, behöver inkluderas. Frågan om kvarstående ligament behöver belysas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har utarbetat ett system för kravhantering /14-4/. Syftet är att dokumentera kopplingarna mellan långsiktig säkerhet och konstruktionskrav.

Vi har också presenterat en ny utgåva av konstruktionsförutsättningarna för kapseln /14-3/. Rapporten redovisar status och kunskapsläge. För att utarbeta de slutliga konstruktionsförutsättningarna för kapsel återstår en del arbete. Underlagen måste struktureras och kompletteras så att de innehåller den information som krävs för att säkerställa kapselns funktion och tillgodose myndigheternas behov vid granskning.

Det nära sambandet mellan konstruktionsförutsättningarna och säkerhetsanalysen och det faktum att arbetet med dessa pågick parallellt medför att konstruktionsförutsättningarna /14-3/ inte fullständigt beaktar alla aspekter från säkerhetsanalysen SR-Can. Ett annat område där konstruktionsförutsättningar inte är fullständiga rör acceptanskrav för olika variabler. Vissa av kraven är specificerade men arbete med att ta fram kompletteringar pågår. Konstruktionsförutsättningarna ger alltså i dag inte fullständiga underlag för materialval och detaljerad dimensionering av kapseln men arbete med att få fram en fullständig dokumentation pågår.

Med tanke på den vikt som myndigheterna lagt vid konstruktionsförutsättningar och dimensioneringsunderlag i granskningen av Fud-program 2004 redovisas viktiga delar av dessa i bilaga A.

Program

Inför ansökan för slutförvaret arbetar SKB vidare med att ta fram konstruktionsförutsättningar och dimensioneringsunderlag i enlighet med de krav som anges i bland annat SKI:s utredningsrapport 2006/109 /14-5/.

I konstruktionsförutsättningarna /14-3/ finns en handlingslinje för hur underlagen för kapseln kommer att kompletteras eller förfinas. Handlingslinjen omfattar huvudsakligen frågor som rör material och hållfasthet. Utgående från denna handlingslinje kan följande områden identifieras där vidare insatser krävs. Tidsperioderna är av naturliga skäl ungefärliga som vid all forskningsinriktad verksamhet.

Materialfrågor	Program	Period
Koppars krypegenskaper	Provning av krypegenskaperna hos koppar har pågått under flera år. Under senare tid har undersökningarna koncentrerats kring FSW-svetsens egenskaper, effekter av extremt långsam pålastning och krypning med fleraxligt spänningstillstånd. Resultaten analyseras och sammanfattas och jämförelser görs mot kraven. Frågeställningar kring fosforns långtidsstabilitet har förekommit och grunden för dessa frågeställningar bearbetas vidare. För att beräkna belastningarna på kapseln måste dessutom en validerad krypmodell tas fram då tidsberoende förlopp måste beaktas vid till exempel postglacial skjuvning av kapseln. Av intresse är även att studera krypning vid låg temperatur, 0 °C.	2008–2013
Vätets påverkan på koppar och segjärn	Enstaka bränslestavar kan vara skadade och vatten kan ha trängt in i staven. Eftersom det inte kan garanteras att detta vatten avlägsnas vid den torkning av bränslet som planeras i inkapslingsanläggningen kan vatten finnas i kapseln efter förslutningen. Atmosfären i insatsen byts till argon, men på sikt kan anaerob korrosion av järnet i insatsen uppstå med bildning av vätgas som följd. Av intresse är därför att studera om vätet påverkar de mekaniska egenskaperna hos segjärn och koppar. Om vätet har någon påverkan på materialet så kommer det att utredas vilka halter av väte som kan tillåtas.	2008–2009
Kallbearbetningseffekter i koppar orsakad av hanteringssskador	Plasticering av kopparhöljet kan uppstå vid hantering. Från mekanisk synpunkt leder detta till deformationshårdnader med åtföljande ökning av brottgränsen och minskad brottförlängning. Av intresse är att närmare studera hur krypegenskaperna påverkas av detta. Om kallbearbetning har någon effekt på kapselns långtidsegenskaper så kommer vi att utreda vilken grad av kallbearbetning som kan tillåtas.	2008–2010
Spänningskorrosion i koppar	Under senare tid har möjligheten att spänningskorrosion i kopparhöljet kan uppstå i slutförvaret åter diskuterats. Av intresse är att genomföra spänningsanalyser av kopparhöljet men även att se över den argumentation från kemisk synpunkt som finns inom området.	2008–2010
Tidsberoende egenskaper hos Insatsen	Kapselinsatsens långsiktiga integritet ska verifieras med avseende på krypning och andra tidsberoende fenomen. Försök pågår där krypning i segjärn undersöks.	2008–2012

Hållfasthetsfrågor	Program	Period
Postglaciala jordbävningar	Postglaciala jordbävningar kan ge upphov till skjuvlaster på kapseln som påverkar såväl kopparhölje som segjärnsinsats. Frågan är komplex och beror av såväl geologiska förutsättningar som bentonitbuffertens mekaniska egenskaper. Påverkan på kapseln har studerats och förfinade beräkningar pågår där påverkan på kopparhöljet studeras och där hänsyn tas till detaljutformningen av kapseln.	2008–2012
Marginaler mot tröskel-effekter	Utredning angående samverkan mellan toleranser i indata och marginalen mot tröskeleffekter vid beräkning av kollapslast för insatsen.	2008-2009
Kombinerade lastfall för insatsen	Den totala spänningsnivån som kan uppstå i insatsen då olika belastningar samverkar fastställs.	2008–2010

Hållfasthetsfrågor	Program	Period
Skadetålighet hos insatsen	Av intresse är att studera vilka diskontinuiteter som kan accepteras i insatsen med hänsyn till den totala spänningsnivån som kan uppstå och även till interaktionen mellan olika diskontinuiteter. Ett projekt pågår som syftar till att svara på frågan vilka diskontinuiteter som kan tillåtas i insatsen. Undersökningen kommer att ge underlag för kvalitetskontroll av insatsen med oförstörande provning. Detta projekt kommer också att behandla effekten av eventuella spänningskorrosionssprickor som kan uppstå i insatsen.	2008–2009
Säkerhet mot kriticitet	Effekten av större diskontinuiteter i insatsens mellanväggar på säkerheten mot kriticitet kommer att undersökas. Undersökningen kommer att ge underlag för kvalitetskontroll av insatsen med oförstörande provning.	2008
Hanteringssäkerhet	Att kapseln uppfyller kraven på säker hantering och att kapselns långsiktiga integritet inte påverkas av effekter som uppstår under hanteringen måste säkerställas. Möjliga hanteringsskador kartläggs och deras effekt på kapselns hanteringssäkerhet och långsiktiga integritet analyseras. Missöden under driftfasen studeras och deras påverkan på kapselns förmåga att innesluta bränslet bestäms.	2008–2009

14.3 Tillverkning och oförstörande provning av insatsen

Tillverkning av insatsen, delsystem insats i produktionssystemet för kapseltillverkning, omfattar huvudsakligen processerna: gjutning av insatsen och oförstörande provning. Dessutom omfattar delsystemet stödjande processer så som bearbetning av insatsen samt tillverkning av en stålkaasset och ett stållock /14-6/.

14.3.1 Tillverkning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 presenterade SKB resultat från provtillverkning av insatser och från en omfattande materialprovning. Resultaten visade en relativt stor spridning i materialegenskaperna hos flera enskilda insatser. Störst spridning vid dragprovning hade värdena på brottförlängning. Detta beror bland annat på att materialet innehåller icke nodulär grafit och diskontinuiteter i form av porer och partiklar. Datorsimuleringar av gjutprocesserna vid olika gjuterier har gett en ökad förståelse för parametrar som temperatur och tillsatser. Därmed blir det lättare att styra grafitens form och fördelning i materialet och gjutprocesserna kan förbättras.

SKI ansåg i sin granskning att SKB:s inriktning och program för materialet i insatsen är ändamålsenligt. Det fanns också en förståelse för att inhomogeniteter förekommer i en så grov gjuten kropp som insatsen. Målet ska vara att, med förväntade variationer i strukturen och med förväntade diskontinuiteter, erhalla erforderliga mekaniska egenskaper.

SKI gav också uttryck för sin uppskattning att SKB har beaktat tidigare kommentarer om att insatsernas mekaniska egenskaper bör verifieras ingående och att datorsimuleringsprogram används i utvecklingsarbetet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Gjutningsmetoden har utvecklats under provgjutningarna genom förbättringar av exempelvis infästning av kassetten i botten och ökad gjuten längd för att kunna kapa bort orenheter. Denna utveckling finns beskriven i /14-7/.

Efter år 2004 har tolv insatser gjutits i segjärn, varav nio stycken i BWR-utförande och tre i PWR-utförande. Fram till årsskiftet 2006/2007 har 43 insatser tillverkats totalt (fyra stycken i PWR- och resterande i BWR-utförande). BWR-utförandet med tolv kanaler har ansetts mer komplicerat att tillverka. SKB har därför valt att koncentrera utvecklingsinsatserna på i första hand detta utförande.

Vissa förändringar har skett på leverantörssidan. Ett nytt gjuteri har tillkommit medan två har fallit ifrån. Detta har möjliggjort en mer samlad utveckling och ökad takt i utvecklingsarbetet.

För att visa att insatsens har tillräckligt hög hållfasthet har en probabilistisk analys av insatsens förmåga att möta de spänningar och belastningar som den utsätts för i slutförvaret genomförts /14-8/. Ett testprogram har använts för att bestämma den statistiska fördelningen av materialparametrar och diskontinuiteter hos tre olika insatser. Med utgångspunkt från den fördelningen beräknas sannolikheten för plastisk kollaps orsakad av högt tryck eller för brott orsakat av spricktillväxt i regioner med dragspänningar. Resultatet visar att sannolikheten för brott är mycket låg i båda fallen. Dessutom har försök gjorts för att visa kapselkonstruktionens – och speciellt insatsens – tillförlitlighet när det gäller yttre övertryck. Provbekastning i form av två tryckprov har genomförts på förkortade kapslar med insatsens höjd 950 millimeter. Vid båda tryckproven har belastningen successivt ökat till cirka 130 MPa /14-9/. Tryckproven visar på en hög säkerhet i förhållande till det tryck som kapseln konstruerats för, vilket är satt till 45 MPa /14-3/.

SKB genomför ett utvecklingsprogram för att tillverka insatser i samarbete med våra leverantörer. Programmet omfattar totalt tolv insatser. Utveckling pågår för PWR-insatser och processen behöver optimeras för att säkerställa att måttkraven på bränslekanalerna kan uppfyllas innan en demonstrationsserie kan genomföras. När det gäller BWR-insatser har utvecklingen nått längre och hittills har fem BWR-insatser tillverkats med bra resultat. Ytterligare fem BWR-insatser kommer att tillverkas under seriemässiga förhållanden för att se vilken kvalitet som kan förväntas under serieproduktion. Dessa insatsers kvalitet ska utvärderas. I programmet tas tillräckligt med underlag fram för att en prekvalificering av processen ska kunna genomföras under 2007. Dessutom kommer två insatser av PWR-typ att tillverkas.

Tekniska specifikationer och ritningar finns framtagna för övriga komponenter som ingår i insatsen, som stålkaassett, stållock och bult. Dessa får ses som preliminära eftersom olika beräkningsunderlag och data successivt kommer fram och förändringar kan ske.

Program

Tillverkningen av komponenter till insatsen kommer att vidareutvecklas hos flera av leverantörerna. För den framtida tillverkningen kommer SKB att behöva anlita flera gjuterier för att klara leveranserna av de 200 insatser som krävs årligen. De tekniska specifikationerna för insatsen har under utvecklingsarbetet successivt anpassats och fortfarande kan mindre justeringar komma att ske.

Under den kommande treårsperioden planerar SKB att:

- Intensifiera utvecklingen av tillverkningen av PWR-insatser.
- Serietillverka BWR-insatser, samt ta fram underlag för en prekvalificering av gjutningsprocessen.
- Analysera tillförlitligheten vid tillverkning och kontroll av insatser.
- Genomföra erforderlig teknikutveckling för att säkerställa att tillräcklig kapacitet för bearbetning och provning finns i framtiden.
- Säkerställa långsiktiga leveranser genom att fortsätta utveckla tillverkningsprocessen hos ett nytt gjuteri.

I ett längre tidsperspektiv kommer SKB att arbeta enligt programmet för kvalificering /14-2/, där kvalificering av tillverkningen av insatser ingår.

14.3.2 Oförstörande provning

Insatsen ska kontrolleras med oförstörande provning (OFP). Denna provning görs för att finna så kallade diskontinuiteter i materialet. Den primära kvalitetshöjande åtgärden är att styra upp tillverkningsprocesserna så att erforderlig tillverkningskvalitet säkerställs. Oförstörande provning ska verifiera att tillverkningskvaliteten är den avsedda. Dessutom är OFP ett viktigt utvärderingsredskap under utvecklingsarbetet. Vi måste visa att vi kan tillverka kapslar som uppfyller konstruktionskraven. Arbetet med OFP bedrivs främst vid Kapsellaboratoriet i Oskarshamn.

Olika provningsmetoder kommer att utvecklas för att kunna avsöka insatsens komplicerade geometri. Det är även viktigt att provningen kan automatiseras, eftersom insatsen är relativt stor.

Vissa detaljer, till exempel stållock och bultar, är standardprodukter och möjliga att köpa in med tillhörande kvalitetscertifikat. Vilken belastning dessa detaljer utsätts för styr om det behövs någon form av provning av dessa. Detta kommer att utredas.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Vid granskningen av Fud-program 2004 ansåg SKI och SSI att kraven på OFP-metoderna måste fastställas och konkretiseras. Detta är ett område som det pågår intensivt arbete inom. Hållfasthetsanalyser utifrån konstruktionsförutsättningarna /14-3/ pågår, vilket ska leda fram till krav på den oförstörande provningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB arbetar för att ta fram preliminära OFP-metoder för de olika komponenterna i kapseln. Detta redovisades delvis i /14-10/ och nuvarande kunskapsläge sammanfattas här.

Vid en första jämförelse mellan olika OFP-metoder framstår ultraljud som den lämpligaste tekniken /14-10/. Detta stämmer väl överens med vad som används inom övriga industribranscher för att prova liknande komponenter. SKB har införskaffat ett ultraljudsystem för vinklad avsökning (phased array) av svetsar. Detta kommer också att användas vid utveckling och utprovning av preliminära provningsmetoder för komponenterna. För att kunna prova insatsen på ett rationellt sätt behövs system för mekaniserad avsökning /14-10/.

Provningsmetoder

Fyra provningsmetoder har utvecklats för provning av insatsen med ultraljud, se figur 14-3:

- Pulseko normalavsökning: Området 30–200 millimeter under mantelytan provas.
- TRL (Transmitter Receiver Longitudinal): Dubbelkristallteknik som används för att prova området 0–50 millimeter närmast mantelytan.
- Transmissionsmetod: Används för att prova de inre områdena mellan kanalerna. Denna metod använder sig även av en pulsekoteknik för att ge ytterligare information.
- Vinklad avsökning: Olika områden söks av med olika vinklar. Metoden innebär att området vid de yttre kanalrören avsöks med fyra olika vinklar.

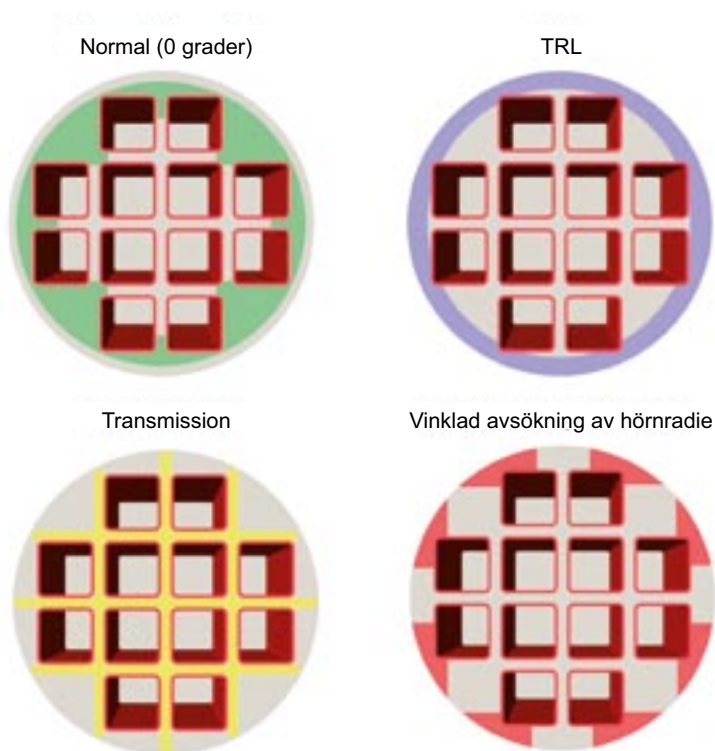
TRL-metoden använder en 2 MHz dubbelkristall där den longitudinella vågen bryts till 70° i segjärnet. Metoden används framgångsrikt för provning av reaktortankar inom kärnkraftsindustrin och syftar till att detektera diskontinuiteter i och under ytan. Avsökningen sker med fyra sökare samtidigt i olika riktningar.

Preliminära undersökningar av insatsens hållfasthet visar att det är områdena runt de yttre kanalrören som är de mest belastade. Därför sker mer omfattande provningar i dessa områden, bland annat används ljudfältstyrning, så kallad sektorskanning. Totalt görs fyra olika avsökningar.

Utvärdering av de olika avsökningsmetoderna pågår.

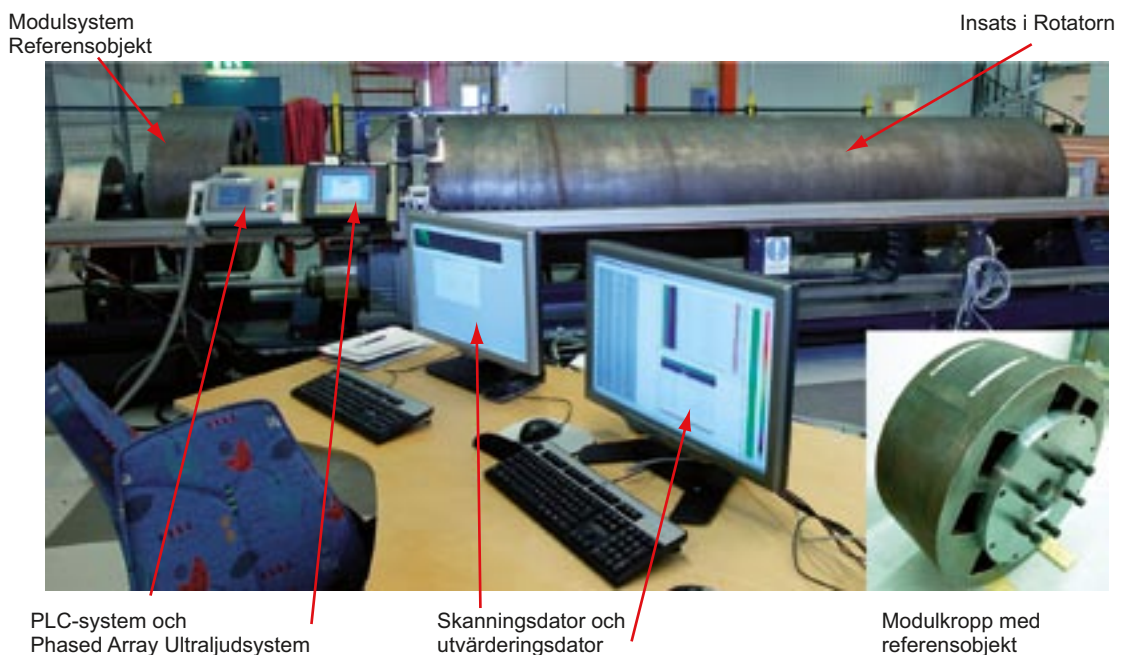
Manipulator

En övergripande beskrivning av den manipulator som finns vid Kapsellaboratoriet redovisas i /14-10/. Förutsättningarna för manipulatorn är att komponenternas rotationssymmetri kan utnyttjas vid avsökningen. De preliminära provningsmetoderna, som tidigare nämnts, förutsätter att det går att komma åt segjärnsinsatsens mantelyta. Det behövs två komponenter till manipulatorn för att möjliggöra avsökningen: en mekanisk utrustning för att förflytta objektet samt fixturer för att hålla olika sökare på plats vid skanningen.



Figur 14-3. Insatsen, de olika avsökningsområdena för provningsmetoderna är färgade i figuren.

Vid Kapsellaboratoriet har SKB upprättat en station för provning av komponenterna: kopparrör, kopparlock och bottenar samt segjärnsinsatsen. De mekaniska delarna av manipulatorerna styrs med PLC-system (programmable logic controller). Styrsystemet ger möjlighet både till att styra de olika axlarna och till automatiserade avsökningsförfaranden. Två manipulatorer används: en för insats och kopparrör (rotator), se figur 14-4, och en för kopparlock och bottenar (rotationsbord), se figur 14-7.



Figur 14-4. Rotatordel av OFP-station för kontroll av kapselkomponenter.

Rotatorn har ett antal funktioner som ska säkerställa och underlätta provningen. Vid ena sidan av rotatorn finns det särskild uppriggning för att hantera referensobjekt. Syftet med denna del är att hantera referensobjekt på ett rationellt sätt. Förutsättningar för referensobjekten ska vara desamma som för objektet som ska provas. För att underlätta tillverkningen och hanteringen av referensobjekten har ett modulsystem tagits fram, vilket gör det möjligt att fästa mindre kroppar i en insatsskiva/kopparrör.

Avsökning kan ske genom spiralformad avsökning eller genom att sökaren stegas fram mellan varje fullbordat avsökningssvarv. Även andra avsökningssätt är möjliga.

En immersionstub används för provningen med pulseko (normalavsökning), se vänstra bilden i figur 14-5. Funktionen för denna är att bilda en vattenspalt mellan array och objekt. För att kunna optimera positionen av arrayen är immersionstuben flexibelt byggd, så att det är möjligt att variera avståndet och vinkeln mot objektet i både tangentiell och axiell led.

Provningen med TRL-sökare innebär att sökarna är i direkt kontakt med objektet. Fixturens funktion är att trycka sökarna mot objektet, samtidigt som de hålls på plats utan att kontakten med objektet förloras, se högra bilden i figur 14-5.

Vid transmissionsprovningen används två arrayer som positioneras på ömse sidor av insatsen. I dagsläget finns det en prototypfixtur framme, som har använts med framgång. Vissa förändringar måste dock göras för att produktionsanpassa den.

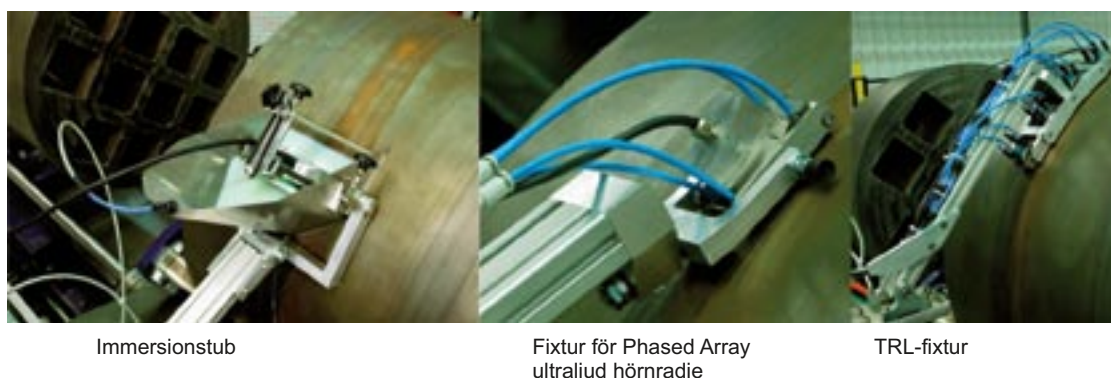
Vid sektorskanning är wedgen (vinklad försats) i kontakt med objektet, se mittbilden i figur 14-5.

Stödjande information

Materialstrukturen påverkar ultraljudprovningarna. En viktig faktor för materialstrukturen är segjärnets nodularitet. Det finns möjlighet att mäta nodulariteten för segjärn, dock bygger befintliga metoder på att godstjockleken är känd. SKB har undersökt om det finns möjlighet att mäta nodulariteten med olika ultraljudstekniker. Resultatet av studien kommer att utvärderas under 2007.

Vi utvärderar om det förenklar provningen att ha ett speciellt bearbetningsskede, innan den volymetriska provningen ska utföras. Detta innebär att insatsen ska ha en viss geometri (anpassad för provningen).

De stagplåtar som fixerar bränslekanalerna under gjutningen av segjärnsinsatsen förhindrar provning av vissa områden. Pågående skadetålighetsanalyser pekar mot att det material som inte är möjligt att prova inte heller tillför något från hållfasthetssynpunkt. Slutlig ställning i denna fråga beräknas kunna tas under första halvåret 2008.



Figur 14-5. Olika fixturer för provning av insatsen i rotatorn.

Program

Det kommande arbetet syftar till att utveckla tillförlitliga provningsmetoder för segjärnsinsatsen. Dessa provningsmetoder ska vara möjliga att kvalificera för att de ska kunna användas i kapsel-fabriken.

De aktiviteter som planeras under de kommande tre åren (2008–2010) finns beskrivna i /14-10/. I ett första skede ska provningskonfigurationer fastställas och hänsyn ska tas till förväntade diskontinuiteter och preliminära acceptanskriterier. Vissa förutsättningar (materialstruktur, geometri och provningssystem) planeras också att tas fram. För att få ytterligare förståelse för resultat och eventuella begränsningar i provningsförfarandet kommer även modelleringar att utföras.

Under perioden 2008–2010 ska även tillförlitligheten hos de utvalda metoderna studeras. Underlag för preliminära strategier för kvalificering av metoder för oförstörande provning ska också tas fram och redovisas.

Under den andra treårsperioden (2011–2013) kommer andra verksamheter att vara aktuella. Till exempel planeras aktiviteter för att ta fram underlag inför kvalificeringar. För att detta ska vara möjligt måste provningssystemen vara fastställda och tekniska motiveringar vara framtagna. Då kapsel-fabriken ska projekteras måste också underlag för provningssystemen fram för detta ändamål.

14.4 Tillverkning och oförstörande provning av kopparhöljet

Tillverkningen av referenskapselns kopparhölje omfattar följande referensprocesser: gjutning av koppargöt, extrusion av kopparrör, smidning av kopparlock och kopparbotten, svetsning av botten med friction stir welding (FSW) samt kvalitetskontroll av komponenter och bottensvets med oförstörande provning (OFP). Dessutom behövs grov- och färdigbearbetning av komponenter samt färdigbearbetning av bottensvetsen.

Förutom extrusion och FSW har SKB också kompletterande metoder för både tillverkning av kopparrör och svetsning. Dessa är i första hand dornpressning och smidning för att tillverka kopparrör samt elektronstrålesvetsning för att fästa kapselns botten. Beroende på utfallen av utvecklingsarbetet och utvärderingar kan förändringar ske i klassificeringarna av referensmetod respektive kompletterande metod.

14.4.1 Tillverkning

Cylindriska koppargöt används som utgångsmaterial för varmformning av kopparkomponenter. SKB har testat fyra olika metoder för att tillverka rören till kopparkapslarna: rullformning av kopparrör till rörhalvor som svetsas samman och tillverkning av sömlösa rör genom extrusion, dornpressning och smidning. Sedan 1998 har verksamheten koncentrerats på de tre senare alternativen. Tillverkningen av kopparlock och kopparbottnar sker genom smidning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 presenterade SKB resultat och erfarenheter från det fortsatta arbetet med att utveckla metoderna för att tillverka kopparkomponenter genom att bland annat optimera och förbättra verktyg, processparametrar och materialutbyte. Kopparrör med integrerad botten hade tillverkats med dornpressning och ett antal rör hade tillverkats med smide. När det gäller tillverkning av lock och bottnar hade datorsimuleringar och verktygsoptimering använts för att utveckla smide till en fungerande metod för detta.

SKB har valt en ren syrefri koppar som uppfyller standarden EN 1976:1988 för Cu-OFE eller Cu-OF1 med ett antal tilläggskrav. Ett av tilläggskraven berör medelkornstorleken i materialet. Kornstorleken påverkar egenskaperna och förutsättningarna för ultraljudsprovning. SKI angav i sin granskning att det saknades en fullständig redovisning som motiverar tilläggskravet på kornstorlek. Ett annat tilläggskrav angav maximal syrehalt. Detta hade satts för att materialet ska kunna elektronstrålesvetsas. SKI påpekade att det inte framgick av SKB:s redovisning vilka krav som måste ställas på syrehalten i kopparn om friction stir welding används.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Provgjutning av koppargöt för att tillverka kopparrör till kapseln har utförts i samarbete med Outokumpu Poricopper Oy, numera Luvata. Under perioden 2004–2006 har 19 stycken koppargöt tillverkats. I provgjutningarna har halvkontinuerlig gjutning av göt med diametern 850 millimeter och i vikter upp till 13,5 ton utförts. Vid provtillverkningen av rör med 50 millimeters vägg tjocklek har det ibland varit svårt att få tillräckligt långa rör. Kapaciteten vid tillverkning av göt har därför under senare tid ökat till 16 ton. Detta har också medfört att det område i götens startända, som kan innehålla defekter, kan kapas bort med tillräcklig marginal. Tidigare svårigheter att uppfylla kravet på låg syrehalt i hela götet, att fosforhalten har varit ojämnt fördelad och att kaviteter har uppträtt i centrala delar av göten har kunnat lösas. Senare göt har uppvisat goda resultat. Den kemiska sammansättningen hos de tillverkade göten har analyserats. Resultaten visar att göten uppfyller kraven på den kemiska sammansättningen /14-11, 14-6/.

Wyman Gordon Ltd i Livingston, Skottland, har en stor press för vertikal extrusion (presskraft på cirka 30 000 ton), i vilken SKB:s kopparrör kan pressas. Förutom rör med vägg tjockleken 50 millimeter har även några rör med mindre vägg tjocklekar (40 och 30 millimeter) tillverkats. Extrusion ger kopparrör med en finkornig materialstruktur som väl uppfyller kravet i konstruktionsförutsättningarna på 800 mikrometer /14-3/. Även SKB:s specifikation med kornstorlek < 360 mikrometer uppfylls i prov tagna från rörändarna. Konstruktionsförutsättningarna beaktar materialets hållfasthetsegenskaper, medan specifikationen dessutom beaktar att det krävs en finare struktur för att komponenterna ska kunna provas med ultraljud. Det senare kornstorlekskravet kan komma att ändras när mer kunskap från ultraljudsmätningar finns framme. Fram till årsskiftet 2006/2007 har totalt 23 rör tillverkats med extrusion, varav åtta stycken efter Fud-program 2004. De åtta senast extruderade rören tillverkades i serier om fyra stycken i följd, vilket var en väl fungerande produktionstakt.

I samband med utveckling av metoder för att prova kopparrör med ultraljud har vi upptäckt lokala förändringar i materialstrukturen längs extruderade rör. Vissa områden har visat sig ha hög dämpning av ultraljud. Metallografiska undersökningar av några av dessa områden har visat förändrad materialstruktur. Detta måste utredas vidare. Det kvarstår också att utveckla extruderingsprocessen för att få bättre kontroll över rörets geometri.

I samarbete med Vallourec & Mannesmann Tubes i Düsseldorf har provtillverkning av kopparrör ägt rum med dornpressning (pierce and draw process). Det som är speciellt för denna metod är att dornen inte pressas genom hela götet. En 200–300 millimeter tjock botten kan lämnas kvar. Metoden ger på detta sätt rör med integrerad botten. Detta är en fördel, eftersom en botten inte behöver tillverkas och svetsas fast. En svårighet har varit att få en genombearbetad och finkornig materialstruktur i bottenmaterialet. Utvecklingsarbetet med nya provtillverkningar pågår i syfte att erhålla en finkornig struktur även i denna del. För detta krävs en kraftigare bearbetning och därmed också kraftigare töjning av bottenmaterialet. Om detta lyckas kan metoden sannolikt användas för att tillverka rör med integrerad botten, i vilka materialstrukturen är helt igenom godkänd. Hittills har ett rör med godkänd bottenstruktur tillverkats. Fram till årsskiftet 2006/2007 har totalt nio rör tillverkats med dornpressning.

Provtillverkningen av kopparrör genom smidning har skett i samarbete med Scana Steel Björneborg AB, i Värmland. Ett utvecklingssamarbete har lett fram till att rören nu kan smidas med några få arbetsoperationer. Smidning ger ett finkornigt kopparmaterial. Fram till årsskiftet 2006/2007 har totalt sju rör tillverkats med smidning. Fortsatt utveckling av smidesprocessen är nödvändig för att få bättre kontroll på rörets geometri.

Under den senaste treårsperioden har 117 göt för att framställa lock och botten tillverkats hos Norddeutsche Affinerie AG. Utvecklingsarbetet för att tillverka kopparlock och kopparbottnar har skett i samarbete med Scana Steel Björneborg AB. De förformade ämnena har smidits av kontinuerligt gjutna kopparämnen med diametern 500 millimeter och vikten cirka 1 100 kilo. Arbetet har varit inriktat på smidning i ett slutet verktyg vid cirka 650–700 °C. För att hålla kraftbehovet i smidespressen så lågt som möjligt och för att få bättre materialfyllnad i verktyget har ett extra stukningssteg med en sfärisk dorn införts. Kraftbehovet blir annars relativt stort på den stora yta som locken utgör. Processen avslutas med räckning, vilket innebär att lockämnets yta smids uppdelat i flera steg. Räckningen ger bättre fyllnad i verktygets botten och ett mindre totalt kraftbehov. Metoden ger kopparämnen som maskinbearbetas till färdiga lock och bottnar med bra

materialstruktur och förlängningsvärden. Lock har tillverkats i en serie om 19 lock i följd. Metoder för att prova hela lock med ultraljud har tagits fram på Kapsellaboratoriet. Vid ultraljudsprovning har det framkommit att tillverkade lock har ojämn dämpning på grund av lokala strukturvariationer i locket. Smidesprocessen behöver utvecklas ytterligare genom till exempel ökad processkontroll.

Under senare tid har införandet av friction stir welding som förslutningsmetod medfört att kraven på lock- och bottenmidets höjd ökat. Det uppnås genom att man använder ett modifierat verktyg, där en annan fördelning av volymen från götet fås (högre och smalare). Det har i sin tur krävt förändringar i smidesprocessen. En så kallad utstötare har införts för att få ur smidet från verktyget. Detta kan deformera smidet. Modifieringar av smidesverktyget beräknas dock kunna lösa detta problem. Ett utvecklingsarbete pågår med friction stir welding med sikte på att kunna svetsa lock med samma geometri som de lock som används vid elektronstrålesvetsning. Smidesprocessen kommer att optimeras vidare.

SKB planerar att använda samma referensmetod för att svetsa fast botten som för att svetsa fast locket (förslutningen), det vill säga friction stir welding. Denna metod har visat sig vara en repeterbar och tillförlitlig metod, samtidigt som den ger en bra materialstruktur och god kvalitet på svetsen. En skillnad är att botten svetsen görs innan det använda bränslet placerats i kapseln. Detta moment sker således inte i en kärnteknisk anläggning.

Utvecklingen av laserteknik för att mäta kopparrörens dimensioner har fortsatt. För att mäta raket och rundhet hos de tillverkade kopparrören har en lasermätutrustning tidigare tagits fram i samarbete med Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Denna är beskriven i en lägesrapport /14-11/. Utrustningen, som dock fortfarande är en prototyp, har sedan dess förbättrats på nedanstående punkter, se även figur 14-6:

- Rundstången som laserhuvudet förflyttas på inne i röret är utbytt till en vagn med hjul, vilket avsevärt underlättar transporter och handhavande.
- Laserhuvudet roterar automatiskt.
- Risken för handhavandefel har minskat med det nya utförandet, då bland annat inställningarna vid start av mätningen har förenklats.

Program

Utvecklingen av de alternativa tillverkningsmetoderna av kopparrör, smidning och dornpressning, kommer att fortsätta. Ett antal provtillverkningar är inplanerade de kommande åren.



Figur 14-6. Lasermätutrustning på Kapsellaboratoriet, december 2006.

Under den närmaste treårsperioden kommer vi att arbeta med att förbättra den geometriska noggrannheten i processen extrudering. Vidare kommer studier av lokala variationer i materialstrukturen längs extruderade rör att genomföras.

Metoden att smida fram lock- och bottenämnen behöver utvecklas ytterligare för att uppnå ännu lägre strukturvariationer och därmed jämnare ljuddämpning. Ett led i detta arbete är att öka processkontrollen av styrande parametrar under smidningen.

För att underlätta deponeringen av kapseln är ett önskemål att kapseln har en plan botten. Den nuvarande bottenutformningen motsvarar lockets utformning med en krage i periferin. Ett utvecklingsprojekt med syfte att undersöka tillverkningsbarhet, svetsbarhet samt provbarhet med OFP för en kapsel med plan botten pågår.

Dessutom kommer smidesverktyget för lock att vidareutvecklas.

Undersökning av tillverknings- och provmetodernas tillförlitlighet görs på samma sätt som de studier som genomförts inom svetsning.

SKB avser vidare under tiden för och efter den kommande treårsperioden att:

- Undersöka hur maskinbearbetning och provning av ett stort antal kopparkomponenter kan göras.
- Etablera ytterligare en långsiktig leverantör av stora koppargöt.
- Genomföra aktiviteter enligt kvalificeringsprogrammet /14-2/.

14.4.2 Oförstörande provning

Alla kopparkomponenter ska kontrolleras med oförstörande provning (OFP). Denna provning görs för att finna eventuella avvikelser, diskontinuiteter, i materialet och för att bekräfta att tillverkningen fungerar som den ska. Arbetet bedrivs främst vid Kapsellaboratoriet.

Olika provningsmetoder kommer att användas då de olika komponenterna har olika geometri. Det är även viktigt att provningen kan automatiseras, eftersom stora ytor/volymer ska undersökas.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Se avsnitt 14.3.2 för övergripande information om oförstörande provning av komponenterna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB arbetar för att ta fram preliminära metoder för oförstörande provning för de olika kopparkomponenterna. Detta redovisas delvis i /14-10/ och nuvarande kunskapsläge sammanfattas här.

För kopparkomponenterna framstår ultraljud som den mest fördelaktiga tekniken /14-10/. Detta stämmer väl överens med vad som används inom övrig industri vid provning av liknande komponenter (rör etc). SKB har ett befintligt phased array-ultraljudsystem, som används för de preliminära provningsmetoderna. Erfarenheterna från provningsverksamheten vid Kapsellaboratoriet har legat till grund för valet av parametrar för komponentprovningen av kopparkomponenter.

Samma rotator som för insatsen används för provning av kopparröret. Kopparlooken och bottnarna kommer däremot att provas i ett rotationsbord. Rotationsbordet är anpassat till samma styrsystem som rotatorn.

För ytterligare information om rotatorn hänvisas till avsnitt 14.3.2.

Provningsmetoder

SKB utvecklar och utprovar två olika ultraljudsmetoder för kopparröret:

- Pulseko normalavsökning.
- Pulseko med vinklat infall 45° i fyra olika riktningar.

Förfarandet är hämtat från standardiserad rörprovning.

Normalavsökningen (longitudinella vågor) sker med frekvensen 5 MHz. Hela kopparrörets volym undersöks med denna metod. Provningen ger primärt information om diskontinuiteter med utbredning i rörets axiella ledd.

För vinklat infall används transversella vågor med frekvensen 2,25 MHz. Ljudets brytningsvinkel är 45° och ljud skickas i fyra olika riktningar $\pm 45^\circ$ i axiell riktning och $\pm 45^\circ$ i tangentiell riktning. Hela kopparrörets volym undersöks med denna metod. Provning sker primärt för att påvisa diskontinuiteter med utbredning i rörets radiella ledd.

Lock och botten provas i ett skede under tillverkningen då de har en så enkel geometri som möjligt. Efter provningen sker slutbearbetning och komponenterna får sin slutliga form. Kopparlocket geometri gör att flera olika avsökningar måste göras. De planparallella delarna av locket i centrum avsöks på samma sätt som kopparröret medan det krävs flera avsökningar av området vid periferin. Vid normalavsökningen (longitudinella vågor) används frekvensen 5 MHz. Provning genomförs från två olika riktningar, vinkelräta mot varandra.

Manipulator

Provningen av lock/botten sker med objektet nedsänkt i en tank som fylls med vatten, se figur 14-7. Ultraljudtekniken som används kallas immersion. Avsökning sker genom att en linjärmodul förflyttar sökaren i radiell ledd samtidigt som objektet roterar.

Stödande information

Materialstrukturen påverkar ultraljudprovningarna. En viktig faktor för materialstrukturen är kopparmaterialets kornstorlek. Kornstorlekens inverkan på ultraljudprovningen har studerats /14-12/. Inom detta område krävs fler studier för att vi med säkerhet ska kunna ställa rimliga krav på materialstrukturen samt säkert kunna säga hur den påverkar ultraljudprovningen.



Figur 14-7. Rotationsbordet. Lock och botten sänks ner i en vattenfylld tank där de undersöks med ultraljud.

Program

Det kommande arbetet syftar till att se till att säkerställa att det finns tillförlitliga provningsmetoder för kopparkomponenterna. Provningsmetoderna ska vara möjliga att kvalificera. Vidare ska även metoderna kunna användas för framtida kvalificeringar av system för provning i kapselfabriken.

Framtida aktiviteter för kopparkomponenterna skiljer sig inte så mycket från vad som ska göras när det gäller segjärnsinsatsen, se avsnitt 14.3.2. Vissa materialspecifika frågor är inte desamma för insatsen och kopparkomponenterna. I kopparmaterialet är det främst kornstorleken som påverkar provningen. Studier planeras därför för att få ytterligare förståelse för hur materialstrukturen påverkar provningen och vad som kan göras för att få provningen mer tillförlitlig. De aktiviteter som planeras under de kommande tre åren finns beskrivna i /14-10/.

14.5 Förslutning och oförstörande provning av svetsen

Förslutningen av kapseln sker med friction stir welding och kontrollen av svetsens kvalitet görs med ultraljudprovning och radiografering.

I den framtida produktionen planerar SKB att genomföra svetsningen i egen regi, vilket innebär att svetsprocedurer och system för detta ska utvecklas och att svetsssystem ska installeras både i kapselfabriken och i inkapslingsanläggningen. Samma svetsmetod planeras att användas i båda anläggningarna. Systemet som installeras i inkapslingsanläggningen ingår dock i en kärnteknisk verksamhet.

14.5.1 Svetsning

SKB har, sedan flera år, utvecklat två metoder för svetsning av kapseln. Den ena metoden är en termomekanisk fasttillståndprocess, en form av friktionssvetsning som kallas friction stir welding (FSW). Metod nummer två är en smältsvetsmetod – elektronstrålesvetsning (electron beam welding, EBW) /14-1/. Utrustningar för friction stir welding och elektronstrålesvetsning finns i Kapsellaboratoriet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Eftersom svetsutrustningen påverkar utformningen av inkapslingsanläggningen måste SKB välja referensmetod innan ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen lämnades in.

SKI:s bedömning var att SKB har gjort stora framsteg i utvecklingen av friction stir welding som förslutningsmetod och att programmet bedrivs på ett rimligt sätt. Resultat från utvecklingsarbetet saknades dock. För friction stir welding återstod att visa om – och i så fall hur – svetsmaterialets egenskaper skiljer sig från grundmaterialets, samt hur eventuella föroreningar i svetsen påverkar kvaliteten. SKI förutsatte att allt detta skulle presenteras i samband med ansökan om inkapslingsanläggningen.

I sin granskning påpekar myndigheterna att SKB har gjort många framsteg och förbättringar när det gäller elektronstrålesvetsning, men att tillförlitligheten hos metoden inte har visats på ett tillfredsställande sätt. SKI ansåg vidare att det presenterade programmet för fortsatt utvecklingsarbete var för kortfattat för att bedöma om elektronstrålesvetsning kommer att kunna utvecklas till en användbar metod.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Efter att noga ha analyserat resultaten av svetsförsöken med de två metoderna valde SKB år 2005 friction stir welding som referensmetod i inkapslingsanläggningen. De viktigaste kriterierna för att välja denna metod är svetsprocessens och utrustningens höga tillförlitlighet, samt att kvaliteten på svetsarna blir mycket hög både vid seriesvetsning och vid övrig svetsning. Friction stir welding uppfyller således samtliga krav som ställts både avseende process och system /14-1/.

En annan fördel är att friction stir welding, som är en icke smältande svetsprocess, ger mycket goda materialegenskaper i svetsgodset. Elektronstrålesvetsning uppfyller visserligen de krav som ställs på själva processen, men kraven på systemets tillförlitlighet och demonstrerad svetskvalitet uppfylls inte. De beräknade kostnaderna ligger på liknande nivåer för båda metoderna. Även miljöeffekterna bedöms vara likvärdiga. Detaljerad information om valet och de underlag valet baseras på har publicerats /14-1/.

I och med valet av friction stir welding som referensmetod har fokus vid fortsatt forskning, utveckling och demonstration lagts på denna metod. Eftersom vissa frågetecken återstod vid tidpunkten för valet av referensmetod, har även utvecklingen av elektronstrålesvetsning fortsatt i viss utsträckning. Nedan finns en redogörelse för resultaten från de svetsförsök som gjorts med de båda metoderna.

Friction stir welding

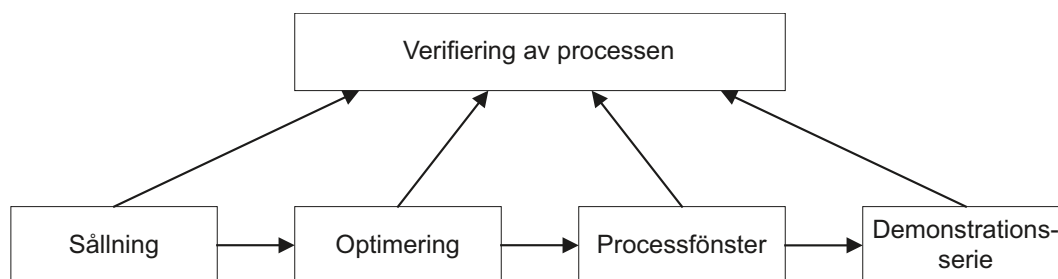
Ett stort antal svetsförsök (59 lock) har genomförts. Försöken har visat att processen är mycket stabil och har en hög repeterbarhet, vilket förklaras av att processen har adaptiv styrning. Temperaturen är en viktig processparameter som mäts kontinuerligt och processen justeras hela tiden för att hålla temperaturen inom ett givet intervall. Inga störningar eller parameterförändringar vid svetsförsöken på Kapsellaboratoriet har påverkat svetskvaliteten. Detta visar att processfönstret är relativt stort. Processfönstret är det tillåtna intervallet som de inmatade parametrarna och de resulterande parametrarna får variera inom, utan att svetsresultatet påverkas.

Inför valet av referensmetod utvärderades svetsprocessen statistiskt. Metodiken för detta beskrivs utförligare i en rapport, som redovisar tillförlitligheten vid förslutningsprocessen /14-13/. Syftet med utvärderingen var bland annat att optimera processen, fastlägga processfönstret och demonstrera svetsprocessens potential i en produktionsliknande svetsserie bestående av 20 locksvetsar, se figur 14-8. Processfönster som fastställdes vid den optimala svetshastigheten på 74,3 millimeter per minut kan ses i tabell 14-1.

Svetsutrustningen på Kapsellaboratoriet har haft nära 100 procents tillgänglighet sedan installationen. Resultatet är mycket bra med tanke på att systemet bygger på ett nytt koncept. Efter varje svetsning byts regelmässigt verktyget ut. Normala variationer i utförandet av verktyget har inte kunnat kopplas till påverkan på svetsresultatet.

Tabell 14-1. Processfönster för FSW samt parametrarnas inverkan på processen och svetskvaliteten.

Parameter	Fönster	Vid högt värde	Vid lågt värde
Spindelrotation (varv/min)	350–450	Risk för hög verktygstemperatur	–
Svetskraft (kN)	78–98	Risk för hög verktygstemperatur	Risk för diskontinuiteter
Verktygstemperatur (°C)	790–910	Risk för verktygsbrott	Risk för diskontinuiteter
Skulderdjup (mm)	0,4–1,5	Risk för diskontinuiteter	Risk för diskontinuiteter



Figur 14-8. Metodik för att verifiera svetsprocessen.

Olika tester har genomförts på locksvetsar utförda med friction stir welding för att bedöma svetsarnas mekaniska och kemiska egenskaper på kort och lång sikt:

- Metallografi: Svetsgodsets struktur – med fokus på kornstorlek – har undersökts i ett femtiotal makrosnitt. Samtliga makrosnitt har en finkornig rekristalliserad struktur med en kornstorlek på cirka 75 mikrometer /14-11/. Kornstorleken är i nivå med grundmaterialet eller till och med något finare.
- Hållfasthetsprovning: Dragprovning har utförts på 45 och 20 millimeter breda plattprovstavar samt på runda provstavar med en diameter på 10 millimeter /14-14/. Resultatet visar att svetsar utförda med friction stir welding har liknande hållfasthetsegenskaper som grundmaterialet, brottgräns (206–209 MPa), sträckgräns (68–82 MPa) eller brottförlängning (48–53 procent). Provstavar, som varit uttagna ur både överlappssekvensen och foglinjesvetsningen, har gått till brott i den värmepåverkade zonen (det vill säga utanför svetsen).
- Krypprovning: Krypprovning med olika belastning och temperatur visar att svetsgodset har liknande krypegenskaper som grundmaterialet /14-15/. Alla provstavar som gick till brott har haft över 40 procent krypduktilitet och jämn förlängning. Ingen av provstavar har uppvisat sprödbrott /14-16/.
- Korrosionsprovning: Korrosionsprovning har genomförts på uttagna prov från fyra locksvetsar. Provet visar ingen tendens till korngränskorrosion i svetsgodset eller galvanisk korrosion mellan grundmaterialet och svetsgodset /14-17/. Ytterligare undersökningar visar att eventuella föroreningar från svetsverket inte ger ökad kopparkorrosion eller försämrade korrosionsegenskaper i svetsgodset /14-18/.
- Restspänningsmätning: Restspänningsmätning har gjorts på en locksvets /14-19, 14-20/. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 39 MPa med en osäkerhet på ± 23 MPa metodbunden osäkerhet (diffraktion – kornstorlek), det vill säga väl under sträckgränsen för svetsgodset. Ytterligare undersökningar pågår och kommer sammanfattas under 2008.
- Kemiska analyser: Kemiska analyser av svetsgodset har utförts på flera locksvetsar. Spår av nickelpartiklar från verktygstappen på upp till 20 ppm samt kopparoxidpartiklar upp till 25 ppm har påvisats /14-21/.
- Svetsning med skyddsgas: För att undersöka möjligheten att eliminera oxidinneslutningar svetsades ett lock i skyddsgas i en argongaskammare, se figur 14-9. Analysen av svetsgodset pågår, men preliminära resultat visar att ett svetsgodset utan oxidinneslutningar kan produceras. Även koncentrationen av metallpartiklar från tappen minskar.
- Ytbehandling av svetsverktyg: Olika typer av ytbehandlingar av svetsverket har provats. Med en lämplig beläggning motstår skiktet en hel svetscykel och svetsgodset är fritt från spår av metallpartiklar från verktygstappen /14-22/. Ytterligare undersökningar av ytbehandlingens inverkan samt av svetsgodsets sammansättning pågår.



Figur 14-9. FSW med argongaskammare.

Både oförstörande och förstörande provning har genomförts för att utvärdera homogeniteten hos lock- och bottenssvetsarna. Svetsarna har både röntgats och provats med ultraljud såväl före som efter bearbetning. Som helhet är svetsgodset mycket homogent. Endast en typ av återkommande diskontinuitet har påvisats vid oförstörande provning och metallografiska undersökningar av svetsarna. Det är en så kallad foglinjeböjning /14-13/. Avvikelsen uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen ut mot ytan, se figur 14-10.

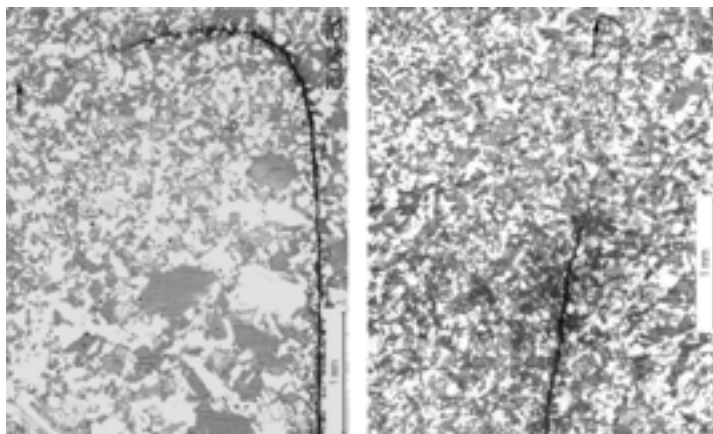
OFP-resultaten från seriesvetsningen visar endast indikationer på foglinjeböjning. Dessa är då lokaliserade till överlappssekvensen. Utsträckningen uppgår maximalt till 4,5 millimeter i de 20 locksvetsarna med ett medelvärde på 3,8 millimeter, se vänstra bilden i figur 14-10. Efter seriesvetsningen fokuserades utvecklingen av svetsproceduren på att minska foglinjeböjningen genom att optimera tappens längd. En kompletterande studie med den utvecklade tappen gav betydligt mindre foglinjeböjning, se högra bilden i figur 14-10. Foglinjeböjningen varierade mellan 0,4 och 1,5 millimeter under 20 svetscykler med den modifierade tappen /14-23/.

Vid tidpunkten då SKB valde referensmetod baserades valet på resultaten från en relativt kort utvecklingsperiod. Vissa av de resultat som valet grundades på var preliminära. En fortsatt teknikutveckling krävdes således. Under den efterföljande perioden har SKB därför prioriterat arbetet med följande frågor:

- Verifiering av mekaniska egenskaper i svetsgodset genom fortsatt krypprovning vid Kimab. Undersökningarna har avslutats och slutsatsen var att krypegenskaperna uppfyller ställda krav /14-24/ med god marginal /14-16/.
- Teknisk utveckling för att minimera diskontinuiteter (foglinjeböjning) i svetsgodset med slutsats att foglinjeböjningen kan bemästras och begränsas till acceptabla nivåer /14-23/.
- Undersökningar av inverkan av oxider och metallpartiklar i svetsgodset samt teknisk utveckling av svetsproceduren. Slutsatsen var att ingen risk för galvanisk korrosion förekommer och att enstaka oxid- och metallpartiklar saknar betydelse /14-18/ samt att oxider och metalliska partiklar kan elimineras från svetsgodset /14-22/.

Med hänsyn till de positiva resultaten vid ovanstående undersökningar är någon förändrad inriktning på svetsprocessen inte aktuell.

Om en FSW-svets inte uppfyller kraven kan reparation av svetsen genom omsvetsning bli aktuell. Hur en omsvetsning påverkar svetsgodset har noga undersökts genom studier av den överlappszon som uppkommer vid alla fullvarvssvetsar. Undersökningarna visar att omsvetsningen inte påverkar svetsgodset vid denna ”regelmässiga omsvetsning”. Parametrar som strukturen, krypegenskaper, korrosionsegenskaper, brott- och sträckgräns, restspänningar etc omfattades av undersökningarna. Detaljerade kriterier för vilka avvikelser i en svets som kan godkännas respektive inte godkännas har ännu inte utarbetats.



Figur 14-10. Foglinjeböjning uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen ut mot ytan.

Elektronstrålesvetsning

Parameterstudier genomförda på Kapsellaboratoriet visar att svetsprocessen är tillförlitlig inom det provade toleransområdet och att ett lämpligt processfönster kan definieras. Ett fullskaleprov, det vill säga svetsning av en kapsel i naturlig storlek med insats, visar att ingen skillnad i kvalitet eller penetration fås jämfört med svetsning i korta rör utan insats. Serieprov, som alla utförts med samma parameterinställning, visar att svetsprocessen är stabil och ger likformigt svetsresultat. Ett byte av katod under seriens gång har dock inneburit en viss förändring av svetsroten. Katoderna, som för närvarande tillverkas manuellt, har ojämn kvalitet vilket påverkar svetsningen.

Att svetsssystemet på Kapsellaboratoriet inte var färdigutvecklat vid leveransen har avspeglat sig i problem med bristande tillförlitlighet och avsaknad av viktiga funktioner. Efter valet av friction stir welding som referensmetod har utvecklingen av elektronstrålesvetsning fortsatt på flera områden, om än i minskad takt.

Två modifieringar i svetsutrustningen har genomförts för att förbättra tillförlitligheten hos svetsssystemet. I september 2006 byttes en strålgenomföring som orsakat problem med höga temperaturer och efterföljande driftstopp. Den nya strålgenomföringen har ett större centrumhål och ökade processfönstret för inställning av en av fokusspolarna betydligt. Den befarade tryckökningen i svetskanonen blev försumbar. I februari 2007 byttes systemet för loggning av svetsparametrarna ut. Det gamla systemet arbetade med för låg frekvens och tappade dessutom ibland kontakten med styrdatoren, vilket orsakade driftstörningar.

Olika tester har genomförts på locksvetsar utförda med elektronstrålesvetsning för att bedöma svetsarnas mekaniska och kemiska egenskaper på kort och lång sikt:

- Metallografi: Samtliga locksvetsar har undersökts i makrosnitt på Kapsellaboratoriet. Två locksvetsar har undersökts med fokus på struktur och kornstorlek /14-25/. Undersökningen visar att svetsgodset har normal stelningsstruktur med typiska pelarkorn vid smältgränsen. Kornstorleken ligger i intervallet 353–639 mikrometer med medelvärde 535 mikrometer.
- Hållfasthetsprovning: Dragprovning har utförts på två tidiga locksvetsar samt från fyra locksvetsar ur svetsserien. Två olika typer av provstavar har använts, platta provstavar med en bredd på 20 millimeter och runda provstavar med en diameter på 10 millimeter /14-14/. Resultatet visar att svetsar utförda med elektronstrålesvetsning har något lägre hållfasthetsegenskaper jämfört med grundmaterialet, brottgräns (179–187 MPa), sträckgräns (47–66 MPa) eller brottförlängning (29–33 procent). Probstavarna som varit uttagna ur både överlappsområdet och enkelsvetsområdet har gått till brott i svetsgodset.
- Krypprovning: Krypprov /14-15/ har utförts på en tidig locksvets, som inte är representativ för nuvarande svetssteknik. Locksvetsningen har utförts med flera svetsvarv vilket medfört att kornstorleken i svetsgodset blivit mycket stor, cirka 2 000 mikrometer jämfört med 535 mikrometer som är medelvärdet med nuvarande teknik som utförs i ett varv. Trots att den stora kornstorleken försämrar kryphållfastheten är marginalen mot sprickbildning mycket god. Kryppduktiliteten i svetsgodset har mätts upp till 20–30 procent.
- Korrosionsprovning: Korrosionsprov /14-17/ har genomförts på fyra tidigt utförda locksvetsar. Proven visar att det är högst osannolikt att korngränskorrosion är ett problem för den långsiktiga säkerheten i slutförvaret. Däremot visade mätningarna en relativt stor skillnad i ytpotential mellan svetsgodset och grundmaterialet. Detta skulle kunna leda till en korrosionscell med svetsgodset som anod. Senare undersökningar har kunnat avfärda dessa farhågor. Sannolikt berodde skillnaderna vid de första mätningarna på skillnader i förhållandena vid ytorna i svetsen respektive grundmaterialet /14-18/.
- Restspänningsmätning: Mätning av restspänningar har utförts /14-19, 14-20/ på en locksvets. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 33 MPa, det vill säga väl under sträckgränsen för svetsgodset.
- Kemiska analyser: Kemiska analyser av svetsgodsets har utförts på flera locksvetsar /14-25/. Den kemiska sammansättningen av svetsgodset är jämförbar med den hos lock och rör. Förekomsten av oxid har även undersökts med hjälp av ett väteförspädningstest på en locksvets /14-21/. Resultatet visade att svetsgodset inte innehåller oxid.

Program

FSW-processen och -systemet kommer att utvecklas med målet att uppfylla samtliga krav som ställs för produktionssvetsning av kopparkapslarna. Svetsgodset vid friction stir welding kommer att undersökas fortlöpande. Följande utvecklingsarbeten planeras:

- För kapselfabriken ska procedurer utvecklas för att svetsa fast botten på kapseln. För svetsning finns två möjligheter, svetsning med kapseln stående eller liggande. Vilket alternativ som väljs beslutas utgående från fabriken utformning.
- Teknik för att reparera defekter i svetsen genom lokal omsvetsning kommer att utvecklas. Inledande prov med en maskinbearbetad defekt på 2×35 millimeter visade att denna defekt kunde lagas, men en utförligare studie kommer att genomföras. I detta arbete ingår även att genomföra ett antal omsvetsningar och utvärdera kvaliteten och svetsgodsets materialegenskaper. En viktig del i utvecklingen är också att kunna starta i ett utgångshål vid foglinjen utan att diskontinuiteter bildas. Aktiviteterna genomförs under 2008–2010.
- Utvecklingsarbete för att öka den tillåtna processtemperaturen och bestämma verktygstappens livslängd och säkerhetsfaktor. Aktiviteterna genomförs under 2007–2009.
- Processens adaptiva kontroll är delvis manuell. Målet är att minska det manuella inslaget och om möjligt utveckla en automatisk kontroll. Aktiviteterna genomförs under 2007–2009.
- När den slutliga svetscykeln är färdigutvecklad finns det sannolikt behov av att optimera processen med avseende på stabilitet och repeterbarhet inom ett så brett processfönster som möjligt. Aktiviteterna genomförs under 2008–2010.
- Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av svetsssystemet i inkapslingsanläggningen, till exempel automatiskt verktygsbyte. Aktiviteterna genomförs under 2009–2010.
- Program för att kvalificera svetsproceduren /14-1/. Aktiviteterna genomförs under 2008–2013.

Eftersom flera frågetecken har rätats ut för friction stir welding under 2005–2006 kommer utvecklingsinsatserna för elektronstrålesvetsning att vara begränsade. Arbetet som beräknas pågå under 2007–2008 kan i korthet beskrivas enligt följande:

- Utveckling av en metod för att precisionstillverka katoder, för att öka repeterbarheten vid katodbyte, pågår tillsammans med TWI.
- Försök med svetsning med full penetration mot löstagbara rotstöd i kopparlockets lyftspår planeras för att eliminera risken för rotfel.
- Utveckling av droppkantens utformning för att minimera risken att svetsmälta rinner över kanten och orsakar diskontinuiteter i svetsgodset.
- Svetsprogrammet för locksvetsning ska utvecklas för att minska risken för diskontinuiteter i överlappsområdet.
- Teknik för automatisk inställning och fogföljning av elektronstrålen kommer att studeras.

14.5.2 Oförstörande provning

Syftet med oförstörande provning (OFP) är att kontrollera att svetsarna inte har avvikelser i svetsgodset, så kallade diskontinuiteter, som innebär att kapselns funktion påverkas. I Kapsellaboratoriet bedriver SKB verksamhet för att utveckla, testa och demonstrera system för OFP /14-26/. Vid Kapsellaboratoriet finns system för digital radiografering (driftsattes 1999) och phased array ultraljudprovning (driftsattes 1998 och ersattes 2002 samt 2005) för undersökning av svetsar utförda med elektronstrålesvetsning och friction stir welding.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB utvecklar metoderna för oförstörande provning parallellt med svetsmetoderna. Inom området ultraljud har arbete lagts ner på att utveckla och specificera provningen av svetsar utförda med friction stir welding. Provmetoderna förbättras successivt genom att de jämförs med resultat från förstörande provning. SKB har också genomfört en utförlig studie för att bestämma OFP-metodernas detekteringsförmåga.

SKI såg positivt på det arbete som bedrivits av SKB för att utveckla provningsmetoderna för svetsen. Programmet är dock ottydligt. SKI förutsatte att SKB redovisar och dokumenterar de provningsmetoder som ska användas, liksom tillförlitligheten hos dem, i samband med ansökan enligt kärntekniklagen om Clab och inkapslingsanläggningen.

SKI påpekade också att det är angeläget att utvecklingen fokuseras på provningsmetoder för den valda referensmetoden för svetsning. Detta är i linje med det arbete som SKB bedriver och beskrivs vidare i /14-26/.

SKB beskrev också sitt utvecklingsarbete för induktiv provning av svetsar. Myndigheten ansåg dock att dess roll inte framgår av programmet. För närvarande anser SKB att induktiv provning inte behövs vid oförstörande provning av kapselns svetsar. Anledningen är tillräcklig information med de förväntade detekteringsmålen och detekteringsförmågan för de använda ultraljudsmetoderna.

SKI ansåg att maskinbearbetningens roll vid oförstörande provning av förslutningssvetsen var oklar. SKB:s ansats är att den slutgiltiga provningen av svetsen ska utföras efter maskinbearbetning, men att det troligtvis kommer att utföras oförstörande provning även innan kapseln bearbetats färdigt. För närvarande pågår försök för att undersöka möjligheterna att försluta kapseln med friction stir welding och ett lägre lock än vad som hittills används. Detta kan medföra att bearbetningens roll vid oförstörande provning av svetsen kan ändras.

SKI betonade att modeller som används för att simulera olika förlopp alltid måste verifieras. Detta ligger inom SKB:s plan för arbetet med att modellera oförstörande provning. De modeller, som används för att underbygga argumentationen för olika provningskonfigurationer, kommer att verifieras.

SSI ansåg att kontrollen av botten svetsen behövde utredas. SKB undersöker för närvarande olika utformningar av kopparhöljets botten. Ett mål i denna undersökning är att definiera ett skede under bearbetningen där oförstörande provning kan utföras med samma parametrar som för förslutningssvetsen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

En milstolpe som uppnåtts är att preliminära provningsprocedurer har fastställts för röntgen och ultraljudsprovning av en förslutningssvets gjord med friction stir welding. Tillförlitligheten för dessa provmetoder har också bestämts. Tillförlitligheten hos de föreslagna provningsmetoderna har redovisats i /14-27, 14-13/.

Arbetet inom området oförstörande provning av kapselns svetsar har redovisats i /14-26/. Redovisningen omfattar insatserna till och med år 2005, samt planer fram till och med år 2012. Redovisningen, som utgår från de krav som ställs på kapseln och hur dessa kan appliceras på provningen, behandlar erfarenheter från system- och processutveckling samt provning av mer än 100 svetsar (> 60 EBW och > 50 FSW). Under december 2004 till januari 2005 genomfördes serier (med både EBW och FSW) bestående av 20 locksvetsar. Dessa kontrollerades sedan med både röntgen och ultraljud under januari och februari 2005. Därmed kunde vi visa att OFP-systemen har goda möjligheter att fungera i en produktionsliknande miljö.

Röntgenutrustningen är mycket stabil och ger hög reproducerbarhet. Utrustningen är byggd för att användas kontinuerligt. De problem med systemet som har uppkommit är en följd av att linjäracceleratoren inte varit igång under långa tidsperioder. Ultraljudutrustningen har överlag uppfyllt SKB:s specifikationer, dock har några begränsningar identifierats. Överföringen av den stora mängd data som genereras från systemet till datorn begränsar till exempel provningshastigheten, samt att programvaran för utvärdering inte heller är optimalt utvecklad för att göra rationella utvärderingar. Phased array-ultraljudtekniken har under de senaste åren utvecklats kraftigt, vilket har medfört att flera leverantörer finns tillgängliga samt att utrustningarnas prestanda ökar.

Med tillförlitlighet vid oförstörande provning menas förmågan att detektera och storleksbestämma defekter samt uppskatta risken för falska indikationer /14-28/. Detta har studerats i ett projekt "NDT Reliability" vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung) /14-27/. Projektet har omfattat en utvärdering av oförstörande provning av svetsar gjorda med både elektronstrålesvetsning och friction stir welding. Syftet var att bestämma detekteringsförmågan, POD (Probability of

Detection), samt noggrannheten vid uppskattningar av diskontinuiteternas storlek. I och med att friction stir welding valdes som referensmetod för förslutning fokuserades slutet av studien på oförstörande provning av svetsar gjorda med denna metod. Detta resulterade i att de resultat som är framtagna för svetsar gjorda med elektronstrålesvetsning har större osäkerheter.

Som utgångspunkt för tillförlitlighetsstudien användes kravet /14-24/ på en resterande koppar-tjocklek av 15 millimeter. För att få fram provobjekt med diskontinuiteter i tillräcklig omfattning utfördes svetsningar under betingelser som inte var normala. Exempel på störningar som infördes är kontaminering och mekaniska skador på fogytor samt avvikelser från normala processparametrar. Syftet var att generera ett stort antal realistiska diskontinuiteter som kan tänkas uppstå i processerna. Dessutom har kompletterande material använts från andra svetsar, där defekter har indikerats med oförstörande provning, för att få ett tillräckligt statistiskt underlag för analysen. Svetsarna undersöktes med radiografering och ultraljudprovning. Objekt och undersökningsresultat från den oförstörande provningen levererades till BAM, där objekten undersöktes med olika referensmetoder. Slutligen har även metallografiska undersökningar utförts för att verifiera diskontinuiteternas förekomst, form och utbredning. Sammanfattningsvis kan vi notera att studien visar att den enda normalt förekommande diskontinuiteten i svetsar gjorda med friction stir welding, foglinjeböjning, kan detekteras till 90 procent ($a_{90,95}$) vid en storlek på 4 millimeter och storleksbestämmas med en noggrannhet på 2 millimeter.

Inom ramen för projektet vid BAM har även en analys av SKB:s system för radiografering mot internationella standarder genomförts. Denna analys visar att systemet uppfyller de kriterier (enligt EN 1435) som ställs på konventionell radiografering.

Inom området modellering av ultraljud har aktiviteter utförts såväl vid BAM som vid SKB. Modellering för oförstörande provning av svetsar gjorda med friction stir welding har i första hand haft till syfte att öka förståelsen för de konfigurationer som används vid provning av svetsar.

För närvarande pågår ingen aktivitet inom området för induktiv provning i och med att kraven på kapselns yta inte är högre för svetsen än för resten av kapseln. Dessutom visar resultaten från projekt "NDT Reliability" att provning med ultraljud och radiografering har tillräckligt hög tillförlitlighet. En metodik har dock utvecklats som vid behov kan anpassas så att provningen av svetsen blir rationell /14-12/.

Program

I och med att studien av tillförlitligheten /14-27/ vid oförstörande provning av förslutningssvetsen har genomförts med hög intensitet under år 2005 och början av år 2006 har vidareutvecklingen inom detta område varit begränsad. Med utgångspunkt från resultaten från tillförlitlighetsstudien och den ökade kunskapen om möjliga diskontinuiteter vid svetsning med friction stir welding, identifieras för närvarande vidareutvecklingsinsatserna.

Syftet med kommande arbete är att säkerställa att en tillförlitlig provning av kapselns förslutningssvets finns tillgänglig enligt SKB:s kvalificeringstidsplan /14-2/. Dessutom ska OFP-systemen anpassas för att göra det möjligt att kvalificera framtida processer i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen.

Programmet för den närmaste perioden (2007–2010) finns beskrivet i kapselredovisningen /14-26/. Det omfattar bland annat en allmän översyn över omfattningen av den oförstörande provningen av kopparhöljets svetsar. Syftet är att definiera vilka provningsmetoder som är relevanta. Dessutom kommer befintliga tekniker för såväl ultraljud som radiografering att undersökas och optimeras genom såväl praktiska försök som modellering. Vidare kommer alternativa tekniker som exempelvis TOFD (Time-Of-Flight-Diffraction) att utvärderas. Ett viktigt område är att ta fram krav på kopparmaterialet för att möjliggöra tillförlitlig provning. Detta omfattar exempelvis att undersöka inom vilka gränser kornstorleken får variera och om störningar orsakas av närliggande diskontinuiteter. SKB planerar att redovisa en preliminär strategi för kvalificering av metoder för OFP under 2007.

Under de kommande åren (2011–2013) kommer fokus att ligga på att ta fram underlag för att möjliggöra kvalificering av provningen. I detta ingår exempelvis att fastställa specifikationer för provningssystem och ta fram tekniska motiveringar. Ett annat viktigt område är att ta fram underlag

för att projektera inkapslingsanläggningen och kapselfabriken. Detta omfattar bland annat att ta fram principer för fjärrmanövrering av utrustningen och kontaktmedel vid ultraljudprovning samt undersökning av vilka effekter kapselns temperatur och strålning har på tänkta ultraljudsgivare.

14.6 Bränsle i inkapslingsanläggningen

I SKB:s ansökan om att få uppföra inkapslingsanläggningen och Clab redogörs för den teknik-utveckling som skett under projekteringsarbetet och som pågått sedan Fud-program 2004. I ansökan redovisas kravbilderna och sådana tekniska lösningar som uppfyller kraven. Under system- och detaljkonstruktionen av anläggningen, som är nästa skede i projekteringen, kan de tekniska detaljlösningarna komma att ändras.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I granskningskommentarerna till Fud-program 2004 efterfrågade myndigheterna en beskrivning av hur fördelningen av bränsleelement i de olika kapslarna ska göras. SKB har gjort en första studie för att optimera kapselinnehållet.

SKI ansåg liksom SSI att SKB bör beskriva hur kontrollmätningen av kärnämne och verifieringen av resteffekten kommer att ske i inkapslingsanläggningen. Några formella krav på att mäta bränslet finns för närvarande inte. Enligt SKB:s planer ska en mätutrustning för gammamätningar finnas i inkapslingsanläggningen. Med hjälp av denna utrustning kan sådana mätningar göras om behovet skulle uppstå. På Clab pågår sedan flera år kalorimetriska mätningar och gammamätningar av enskilda bränsleelement. Syftet är att ta fram en metod för att kunna verifiera resteffekten med hjälp av gammamätningar. Mätningarna syftar även till att validera metoderna för resteffektberäkning. Den visuella verifieringen ska enligt planerna ske i anläggningens hanteringscell när kapseln är fylld med bränsleelement och innan stållocket lyfts på plats och skruvas fast på insatsen.

Av granskningskommentarerna framkom även att SKI saknade en beskrivning av vilka särskilda åtgärder, som kan behöva vidtas i samband med att udda bränsletyper och skadat bränsle (som lyfts ut ur sina skyddsboxar) kapslas in. Då bränsleelement med avvikande mått ska kapslas in placeras distansstycken i insatsens kanaler innan kapseln tas in i processen. Läckande bränsle, som är förvarat i skyddsboxar, hanteras i princip på samma sätt som övrigt bränsle. Skyddsboxens lock demonteras i anläggningens hanteringsbassäng, därefter transporteras skyddsboxen med sitt innehåll upp till torkpositionen i hanteringscellen. Efter torkning lyfts bränsleelementet ut ur boxen och ner i kapseln. Boxarna kontrolleras invändigt och eventuellt kvarvarande material tas ut ur boxen med hjälp av manipulatorer och placeras i kapseln eller tas om hand på annat sätt i avfallshanteringsystemet.

14.6.1 Torkning av bränsle

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Torkning av bränsle behandlades inte i Fud-program 2004.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Torkningsprocessen för bränsle var tidigare utformad som ett varmluftssystem, där luften cirkulerade och fukten kondenserades ut i kylare. Därefter värmdes luften upp igen. Under projekteringsarbetet för inkapslingsanläggningen utreddes möjligheten att använda ett vakuumsystem för att torka bränslet i stället. De beräkningar som gjordes visade att det var fullt möjligt att torka bränslet med hjälp av vakuum. Tekniken innebär att processsystemet blir enklare jämfört med varmluftsvarianten.

Program

Läckande bränslestavar kan innehålla vatten innanför kapslingsrören. Eftersom det finns en gräns för hur mycket vatten som får finnas i en kapsel, är det viktigt att torkningsprocessen garanterar att den maximalt tillåtna vattenmängden inte överskrids. Om en bränslestav har mycket små skador finns en risk att allt vatten inte avgår vid torkningen.

SKB kommer att studera torkningsprocessen ytterligare. Bland annat har kontakt tagits med ett företag, som utvecklat en ny framgångsrik metod för att torka bränsle inför torr mellanlagring.

14.6.2 Mätning av resteffekt

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Mätning av resteffekt behandlades inte i Fud-program 2004.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

En mätutrustning för kalorimetriska mätningar av resteffekt i enskilda bränsleelement har varit i drift på Clab sedan 2003. Totalt har cirka 100 mätningar utförts på både PWR- och BWR-element. Samtliga bränsleelement har även gammamätts. Syftet med mätningarna är att dels förbättra beräkningsmetoderna dels ta fram en tillförlitlig metod för verifiering av resteffekten med hjälp av gammamätningar. För förbättring av beräkningsmodellerna samarbetar SKB med Oak Ridge National Laboratory som får ta del av mätresultaten och använda dessa i utvecklingen av bränsleberäkningsprogrammet Origen-S.

I inkapslingsanläggningen planerar SKB att använda beräknade värden på resteffekt som underlag för urvalet av bränsleelement till kapslarna. Om det behövs, ska resteffekten kunna verifieras med hjälp av gammamätningar.

I de mätningar som hittills genomförts uppvisar beräknade och uppmätta värden god överensstämmelse. För PWR-element har dock en liten systematisk avvikelse konstaterats i mätningarna. Noggrannheten bedöms för närvarande ligga mellan två och fem procent.

Program

Mätningarna i Clab ska enligt planerna fortsätta ytterligare ett antal år. Syftet är dels att få fram ett bättre statistiskt underlag, dels att få fram orsaken till den systematiska avvikelsen i mätningarna för PWR-elementen. Mätprogrammet kommer att utökas med nya bränsletyper allt eftersom de uppnått cirka tio års kyl- och avklingningstid.

14.7 Transportbehållare för inkapslat bränsle

Transport av inkapslat bränsle /14-30/ kommer att utföras på motsvarande sätt som de transporter av icke inkapslat använt bränsle som pågått sedan 1985 från de svenska kärnkraftverken till mellanlagret Clab. Det innebär bland annat att SKB:s transportsystem kommer att användas parallellt för kapseltransporter och övriga transporter såsom transporter av använt bränsle till Clab och avfall till SFR.

För kapseltransporter från inkapslingsanläggningen till slutförvarsanläggningen behövs en specialutformad transportbehållare, som liksom alla andra transportbehållare ska utformas för att uppfylla reglerna i IAEA:s transportrekommendationer /14-29/.

14.7.1 Krav på transportbehållare

De främsta kraven på kapseltransportbehållaren (KTB) är att den ska:

- Vara anpassad till hantering och lastning av kapseln i inkapslingsanläggningen.
- Vara anpassad till hantering och urlastning till deponeringsmaskin i slutförvarsanläggningen.
- Kunna transporteras mellan inkapslingsanläggningen och slutförvaret.
- Skydda kapseln under transport.
- Skydda omgivningen från strålning under transport.
- Skydda omgivningen i händelse av olyckor.

Enligt IAEA:s transportrekommendationer ska, på grund av det totala aktivitetsinnehållet i en kapsel, kraven för ”typ B-behållare” uppfyllas. Det innebär att utförandet inte kan varieras inom särskilt vida ramar.

Det använda kärnbränslet i kapseln avger alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning. Kapseln strålskärmar alfa- och betastrålningen fullständigt, medan gamma- och neutronstrålningen är hög även utanför kapseln. Därför ska gamma- och neutronstrålningen skärmas så väl, att behållaren kan hanteras och transporteras utan ytterligare skyddsåtgärder. Det medför en stor väggtjocklek och en betydande vikt hos behållaren. Ytdosraten på den genomsnittliga kapseltransportbehållaren under transport kommer att vara låg (under 2 mSv/h, mestadels långt under). Behållaren ska även avleda den värme som bränslet i kapseln utvecklar.

De mekaniska kraven på behållare, lock och stötdämpare definieras till största delen från de tester som ”typ B-behållare” genomgår för att garantera täthet även i en extrem olycksituation. Vissa tester genomförs med en prototypbehållare, medan vissa egenskaper verifieras genom beräkningar. Allt detta genomförs av behållarkonstruktören och ingår i kraven för licensiering.

Kontrollprogram finns för dagens transporter, liksom för design och tillverkning av transportbehållare för använt kärnbränsle. De innebär i korthet följande. Tillverkningen ska vara certifierad enligt ISO 9001. Tillverkningen sker i enlighet med en av myndigheten godkänd kontrollplan, och följs upp av ett oberoende kontrollorgan. Det oberoende kontrollorganet intygar att tillverkningen skett enligt specifikationen, vilket ingår i certifieringen (licensieringen).

14.7.2 Transportbehållarens utformning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Transportsystemet beskrevs relativt utförligt i Fud 2004, och den beskrivningen gäller i huvudsak alltjämt.

SKI påpekade i sin granskning att en tidsplan för hela tillverknings- och certifieringsproceduren bör fastställas så att godkända transportbehållare inte blir en flaskhals.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har under 2004–2005 genomfört förstudier beträffande utformning av kapseltransportbehållare hos två internationellt etablerade behållarkonstruktörer. Utförandet av de två olika föreslagna kapseltransportbehållarna är snarlika, även om materialval och konstruktionsdetaljer skiljer sig. Den detaljerade prövningen av behållarens konstruktion sker inom ramen för en licensieringsprövning.

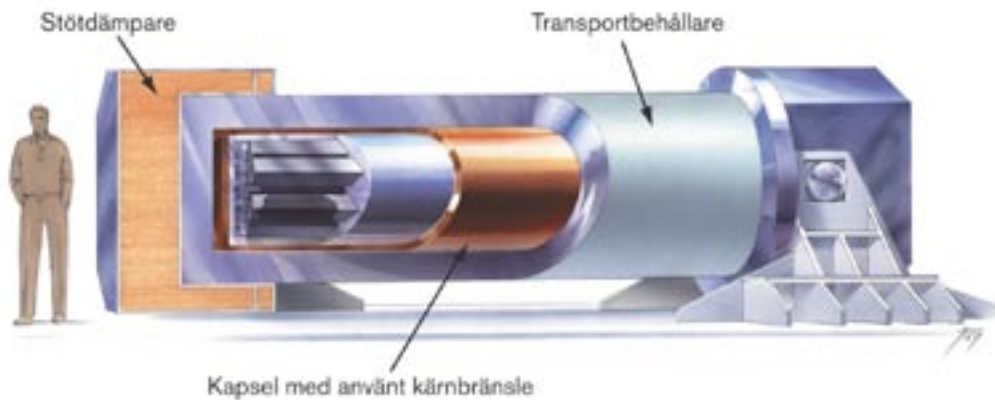
Båda förstudierna är i flera avseenden konservativa, det vill säga de föreslagna transportbehållarna representerar en ”maximal” behållare vad gäller vikt och dimensioner. Behållaren består av en smidd tjockväggig mantel i kolstål eller gjutjärn, vars insida är försedd med ett foder i ett material med låg friktion mot kopparhöljet för att minimera påverkan på kapseln. En botten i samma material som manteln är svetsad till manteln. Behållaren är försedd med två lock; ett inre och ett yttre som skyddar det inre.

KTB, se figur 14-11, har sex lyftappar, fyra i lockänden som används för lyft i anläggningarna och två i bottenänden. Vid transport vilar behållaren horisontellt med fyra lyftappar förankrade i lastbärarens upplag. Stötdämparna, som skruvas till behållarens ändar när den är placerad på lastbäraren, består av ett yttre stålskal fyllt med trä. På så sätt bidrar stötdämparen också till strålskärmmingen av neutroner.

Program

Arbete med att optimera KTB pågår fram till konstruktionsstart så att den:

- uppfyller alla krav som gäller för ”typ B-behållare” tillämpat på transporter av kapslar,
- uppfyller de krav som härrör från SKB:s anläggningar och transportrutiner,
- utformas för en enkel, säker och effektiv hantering i såväl inkapslingsanläggningen som slutförvarsanläggningen,



Figur 14-11. Transportbehållare (KTB) och lastbärare.

- är lätt att underhålla och hålla ren,
- väger så lite som möjligt – med hänsyn tagen till ovanstående krav – för att minska ekipagets totalvikt vid nertransport och väggörning,
- kan fungera tillsammans med SKB:s befintliga transportsystem, det vill säga med de transporter av bränsle respektive avfall som kommer att pågå parallellt med kapseltransporterna.

Alla konstruktionskrav för licensiering uppfylls av de behållare som togs fram i förstudierna. Det som fattas är en ytterligare optimering med hänsyn till kapslarna, transportsystemet och anläggningarna som syftar till en driftsäker och smidig samfunktion under många års drift.

Parallellt kommer SKB att fortsätta delta i och följa de arbeten som görs internationellt vad gäller utveckling av behållarkonstruktioner och revideringar av transportbestämmelserna. Den första behållaren kommer att användas i samband med driftsättning och provdrift av inkapslingsanläggningen och slutförvarsanläggningen, de resterande behållarna levereras successivt. Åtminstone fem behållare bör vara levererade när anläggningarna tas i drift.

14.8 Hantering av kapseln i slutförvaret

Med hantering av kapseln i slutförvaret avses hela hanteringskedjan från det att kapseln anländer till terminalbyggnaden inom slutförvarets bevakade område i en licensierad kapseltransportbehållare (KTB) tills kapseln är deponerad, alla kontrollmoment är utförda och dokumenterade och en tom KTB är returnerad till terminalbyggnaden. Utformning och krav på KTB redovisas i avsnitt 14.7. Hanteringen av kapseln i slutförvarsanläggningen omfattar sålunda mottagning av KTB vid anläggningen, transport av KTB i rampen ned till omlastningsstationen på förvarsnivå, omlastning av kapseln från KTB till deponeringsmaskinens strålskärmsstub samt transport ut till aktuellt deponeringsområde med ett förberett deponeringshål.

Utrustning och rutiner för hantering och deponering av kapslar med använt kärnbränsle ska utformas så att stråldoser till personalen begränsas. Utrustningen och rutinerna ska även utformas så att konsekvenser av missöden och avvikelser från det normala mildras.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Hanteringen av kapseln i slutförvaret beskrevs inte i detalj i Fud-program 2004.

SKI har påpekat att SKB behöver arbeta vidare med hela hanteringskedjan för kapseln i slutförvarsanläggningen, så att verksamheten kan ske på ett ur alla synpunkter säkert sätt. SKI påpekade också att SKB bör redovisa hur lastning och lossning av kapseln ska ske, vad som behöver automatiseras på grund av strålning etc.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har undersökt hela hanteringskedjan för kapseln i slutförvaret. Inom projekteringsarbetet för slutförvarsanläggningen har utformningen av utrustning och fordon som krävs för att genomföra verksamheten studerats.

Transporter i ramp har studerats och en förstudie har genomförts för ett framtida rampfordon för transport av KTB i rampen, från markplanet ned till deponeringsnivån.

Under projekteringsarbetet har även utrymmesbehovet för aktuella utrustningar inarbetats i den preliminära layouten för undermarksdelen med omlastningshall, transport- och stamtunnlar samt deponeringstunnlar.

Under 2005 togs en preliminär konstruktion (basic design) av nästa generations deponeringsmaskin fram. Detta resulterade i att SKB i december 2006 upphandlade detaljkonstruktion och tillverkning av en modifierad deponeringsmaskin, som inte är spårbunden utan har gummihjul.

Program

Nertransport och omlastning

Under 2007–2008 kommer arbetet med den preliminära konstruktionen av rampfordonet att fortsätta. Ett preliminärt val av fordonstyp bedöms kunna ske under 2008, se figur 14-12. Vald fordonslösning kommer sedan att studeras med avseende på driftsäkerhet. Vi kommer också att studera olika typer av missöden i samband med transporten i rampen inklusive olika brandscenarier och hur dessa kan förhindras eller mildras så att konsekvenserna av en brand blir acceptabla. Rampfordonet planeras ha ett navigeringssystem och målsättningen är att transporterna i slutförvarsanläggningens ramp ska kunna genomföras utan förare i fordonet.

Överföring av kapseln från KTB till deponeringsmaskinens strålskärmsstub har studerats som en del av projekteringen av slutförvarets undermarksdel. Tredimensionella ritningar och enkla videoanimationer har genomförts för att beskriva verksamheten i omlastningshallen, för att kunna analysera hela arbetet och för beräkning av dosbelastning till personalen vid dessa arbetsmoment.

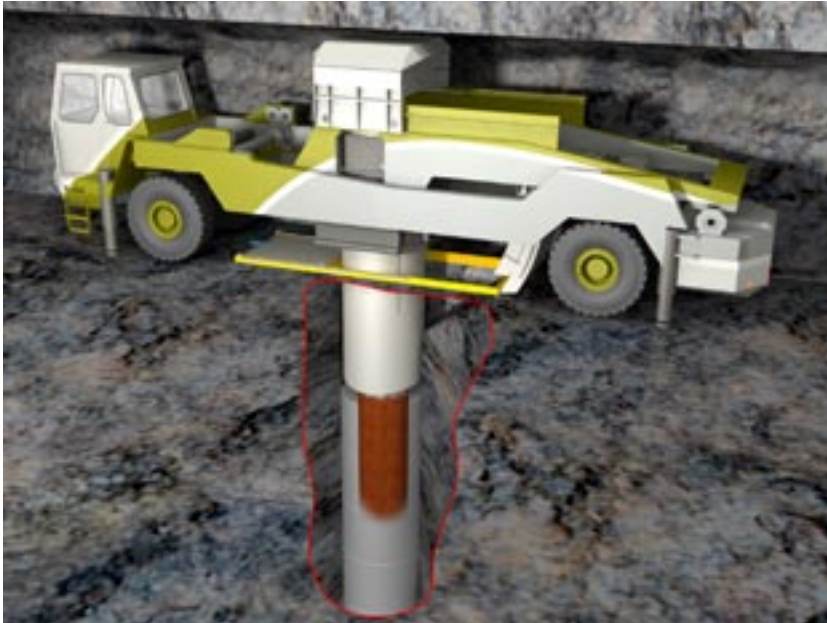
Det framtida programmet innefattar att på sikt bygga upp en komplett omlastningshall i Äspölaboratoriet för att kunna demonstrera hela kedjan med omlastning och sedan deponering av kapseln i ett förberett deponeringshåll.

Deponering

Den modifierade deponeringsmaskinen, se figur 14-13, kommer att levereras till Äspölaboratoriet vid årsskiftet 2007/2008. Denna demonstrationsmaskin ska sedan utnyttjas för att testa hela hanteringskedjan från överföring av kapseln från en KTB till deponeringsmaskinens strålskyddstub till deponering av kapseln i ett deponeringshåll med buffert.



Figur 14-12. Rampfordon för transport av kapseln till undermarksanläggningen.



Figur 14-13. Nästa version av deponeringsmaskinen ska vara försedd med hjul.

I det inledande skedet förutses förenklade utrustningar att användas, men hanteringen omfattar samma dimensioner och vikter som i den framtida slutförvarsanläggningen.

Vissa av dessa tester kommer att påbörjas redan under 2008 och de kommer senare att utökas för att visa att SKB kan genomföra samtliga moment vid deponeringen under realistiska förhållanden, och med maskiner och rutiner som ska användas vid rutinmässig drift. Dessa tester kommer att genomföras i den demonstrationstunnel som finns på 420 meters djup i Äspölaboratoriet.

Deponeringsmaskinen förses med ett navigationssystem och ett positioneringssystem som kommer att bli föremål för omfattande tester. Målsättningen är att kunna genomföra navigering och positionering så att deponeringen till stor del kan ske fjärrstyrt. Testerna med utrustningen under de närmaste åren syftar till att demonstrera att detta är realiserbart.

Det fortsatta programmet kommer att delvis genomföras i samarbete med Posiva, eftersom de avser att hantera motsvarande kapslar och buffertenheter. Planerade demonstrationer syftar till att verifiera att vald metod och utrustning för hanteringen kommer att fungera som planerat.

15 Återfyllningslinjen

Återfyllningslinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av återfyllning i deponerings-tunnlarna och i deponeringshålens översta del. När deponeringstunneln är återfylld installeras en temporär plugg i mynningen mot stamtunneln.

Av färgsättningen av återfyllningslinjen framgår för vilka områden som det finns känd och beprövad teknik som kan appliceras på slutförvaret samt för vilka det krävs teknikutveckling, se figur 15-1.



Figur 15-1. Återfyllningslinjen – SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag.

Figuren beskriver SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag. För de områden som markerats med grå eller grön färg förutsätts normala projekteringsinsatser räcka för att specificera konstruktion och genomförande av de åtgärder som behövs. I något fall kan verifierande tester vara motiverade. För de områden som markerats med gul eller röd färg behövs teknikutveckling. För flera av de gulmarkerade områdena har studier genomförts, men SKB anser att ytterligare insatser för vidareutveckling eller optimering är motiverade.

15.1 Nuläge

SKB har tidigare utvecklat ett koncept för återfyllning av deponeringstunnlar med blandning av krossat berg och bentonit som testats i full skala i ”Backfill and Plug Test” /15-1/ och Prototypförvaret /15-2, 15-3, 15-4/. Konceptet har visat sig ha för liten marginal till de krav som ställs.

SKB har därefter utrett flera koncept för att återfylla deponeringstunnlar /15-5/. I Fud-program 2004 konstaterade vi att ett koncept som bygger på inplacering av förkompakterade block (som kan lyftas för hand) var lovande och skulle utredas vidare. Detta koncept med block av antingen svällande lera (Friedlandlera) eller en blandning av krossat berg och bentonit analyserades i säkerhetsanalysen SR-Can /15-6/. Analysen visar att båda alternativen uppfyller kraven, men att block av svällande lera hade större marginal till de funktionsindikatorer som användes i analysen.

Den fortsatta teknikutvecklingen inriktas nu på att utveckla metoder och utrustning för konceptet med naturlig svällande lera.

Teknik och metoder för att bereda lera inför pressningen till block är känd och beprövad. Blocken kan pressas med exaxlig pressning, enligt den teknik som till exempel tillämpas i industrin för att producera elfasta block. När det gäller tillverkning av pelletar och granuler görs detta på samma sätt som i buffertlinjen. Detsamma gäller även mellanlagring av återfyllningsmaterial. Rensning och stabilisering i deponeringstunnel bedöms kunna ske med beprövad teknik. Den temporära pluggen i tunnelmynningen kan utformas enligt olika principer. SKB utreder i huvudsak två typer – en armerad plugg som förankras i en slits i berget och en friktionsplugg.

Var gränsen går för det högsta tillåtna inflödet av vatten till deponeringstunneln vid installationen av återfyllningen är viktigt att utreda för att säkerställa att återfyllningen ska uppfylla ställda krav.

15.2 Krav och förutsättningar

I sammandrag är kraven på återfyllningen att den ska begränsa buffertens expansion uppåt i deponeringshålet och förhindra att det utvecklas hydrauliska transportvägar i deponeringsorterna så att vattenomsättningen på förvarsnivå påverkas. Kraven på de metoder och den utrustning som behövs för att återfyllningen ska kunna uppfylla förväntade funktioner och för att den ska kunna installeras under drift av slutförvarsanläggningen är att:

- Återfyllningsblocken som ska användas i deponeringshålets översta del ska pressas till specificerad geometri, vatteninnehåll och täthet.
- Återfyllningsblocken som ska användas i deponeringshålets översta del får endast innehålla sprickor och andra inre defekter som kan accepteras med hänsyn till de lyft och den hantering som blocken utsätts för under driften.
- Återfyllningsblocken som ska användas i deponeringsorten pressas till specificerad geometri, vatteninnehåll och täthet.
- Granuler ska produceras med en specificerad storleksfördelning och pelletar pressas till specificerad form och täthet.
- Installation av block och pelletar eller granuler ska resultera i att specificerade mängder material placeras i tunneln, så att erforderlig täthet uppnås.

De temporära pluggarna i deponeringstunnelns mynning har tre syften: att så snabbt som möjligt få till stånd ett vattentryck i deponeringshålen för att underlätta buffertens bevätning, att minska grundvattnets tryckgradient i återfyllningen så att kanalbildning förhindras samt att hålla återfyllningen på plats under bygg- och driftskedet till dess att stamorten har återfyllts.

I kapitel 25 i del IV redovisas de processer som kan påverka återfyllningen på lång sikt och de egenskaper återfyllningen ska ha i initialtillståndet för att på bästa sätt uppfylla funktionen på lång sikt. För att på förhand kunna belägga att den tekniska utvecklingen leder till att de metoder och maskiner vi tar fram verkligen uppfyller de ställda kraven, kommer vi att gå igenom och sammanställa de kontroller och den dokumentation, som under tillverkning, mellanlagring och installation ska säkerställa kvaliteten.

Teknikutvecklingen i återfyllningslinjen kommer i dagsläget att inriktas på en återfyllning i deponeringsorterna som består av en specificerad mängd naturlig svällande lera med en specificerad homogenitet per längdenhet av orten. Viktiga egenskaper hos återfyllningen är täthet hos torr substans, vattenkvot och kompressibilitet. Indikator för den senare storheten är mängden material i olika produkter – block, pelletar och granuler. Den temporära pluggens funktion bestäms av dess täthet, det vill säga läckaget av grundvatten genom pluggen samt mellan berg och plugg.

15.3 Pressning av återfyllningsblock

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 beskrev vi att SKB och Posiva kommer att fortsätta det pågående utvecklingsprogrammet och att tre återfyllningskoncept skulle utredas vidare:

- En blandning av bentonit och bergkross som kompakteras i tunneln.
- Svällande lera som kompakteras i tunneln.
- Förkompakterade block som läggs in i tunneln.

SKI stödde SKB:s planer på att utreda alternativen svällande lera som kompakteras i tunneln och förkompakterade block och kommenterade att det är bra att SKB intensifierat sitt program för att få fram ett fungerande koncept för att återfylla deponeringstunnlarna. I båda alternativen används Friedlandlera som exempel. Beträffande det tredje alternativet ovan påpekade SKI också betydelsen av att utreda frågan om vad en uppskalning av alternativet innebär.

SKI ansåg också att SKB inför kommande ansökningar bör presentera ett koncept för återfyllning av tunnlar. Konceptet bör uppfylla de krav som ställs på slutförvarets funktion.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Sedan Fud-program 2004 har de ovan listade återfyllningskoncept utretts vidare. Alternativet med att placera in förkompakterade block i deponeringstunnlarna verkar mest lovande och arbetet har därför fokuserats på detta koncept.

Den metod som enligt planerna ska användas för att pressa blocken till deponeringstunnlarna bygger på känd teknik med enaxlig pressning.

Tillverkning av block har testats både i laboratorieskala och i industriell skala. Ett syfte med laborietesterna var att fastställa det optimala vatteninnehållet för att uppnå maximal torrdensitet. Testerna gjordes vid två olika presstryck, 25 och 50 MPa /15-7/.

En inventering av teknik för att producera block i industriell skala för återfyllningen har gjorts och provtillverkning av 25 block har genomförts i Tyskland /15-8/, se figur 15-2. Den huvudsakliga slutsatsen från denna provtillverkning är att det är möjligt att tillverka block med tillräckligt hög densitet och produktionshastighet. Provtillverkningen visade också att block med en storlek på 80×60×50 centimeter (0,24 m³) kan produceras vid ett tryck på 30 MPa i kommersiellt tillgänglig utrustning.



Figur 15-2. Några av de producerade återfyllningsblocken (300×300×160 millimeter).

De block av återfyllning som ska placeras i den i övre delen av deponeringshålet har ungefär samma diameter som buffertblocken och kan därför tillverkas med den press som utvecklas för att tillverka buffertblock, se avsnitt 13.3.1.

Program

All teknikutveckling för att pressa blocken till övre delen av deponeringshålet kommer att samordnas med aktiviteterna inom buffertlinjen.

Hur den avfasning, som eventuellt kommer att finnas i deponeringshållets överkant för att ge plats åt strålskärmens deponeringsrörelse ska återfyllas kommer att utredas. Hänsyn måste bland annat tas till den metod som kommer att användas för att ta ut avfasningen – borrar och sprängning, linsågning eller någon tredje metod. Utveckling och tester av hur eventuella block för detta ska tillverkas kommer att bedrivas i Bentonitlaboratoriet.

Vid de i industriell skala genomförda testerna har SKB demonstrerat att block som ska användas i deponeringshålet kan tillverkas med utrustning som finns på marknaden. SKB planerar därför inga stora insatser för att utveckla tekniken för denna typ av blockpressning under den kommande sexårsperioden. Däremot kommer vi att utreda vilka egenskaper som block av möjliga återfyllningsmaterial kan få vid pressning.

All tillverkning av block till kommande storskaliga tester av återfyllning, i bland annat Bentonitlaboratoriet, kommer att göras i befintliga pressar.

15.4 Tillverkning av pelletter och granuler

Utveckling av produktionsmetoder för pelletter och granuler sker enligt beskrivningen i avsnitt 13.3.2. För återfyllningen kan det dock bli aktuellt att tillverka pelletter eller granuler av annat lermaterial än ren bentonit.

15.5 Avlägsnande av dränage och temporärt buffertskydd

Innan återfyllningen av deponeringstunneln kan påbörjas måste dränaget och buffertskyddet i deponeringshålen tas bort. Under normala omständigheter bereder detta arbete inga problem.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Detta förberedande arbete redovisades inte i Fud-program 2004.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Inga insatser har inriktats direkt mot detta område under perioden. Det nuvarande kunskapsläget baserar sig på erfarenheterna från Prototypförvaret i Äspölaboratoriet /15-3, 15-4/. Där kunde buffertskydd och dränage som användes tas bort, trots att en stor mängd kablar till instrument i flera fall fyllde spalten mellan buffertblock och bergvägg.

Program

I slutförvaret är målet att dränage och temporärt buffertskydd ska kunna tas bort med hjälp av fjärrstyrning. Utvecklingen av utrustning för detta kommer att baseras på analyser av händelser och scenarier, som bedöms ha en hög sannolikhet för att inträffa eller medför stora konsekvenser. Till exempel ska det finnas en beredskapsplan och utrustning för att ta bort ett buffertskydd som fastnat. Inför ansökan för slutförvaret ska vi ha testat olika sätt att hantera fel och hur vi ska agera i de allra besvärligaste lägena.

15.6 Installation av återfyllningsblock

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Förutom de slutsatser och kommentarer som redovisas under avsnitt 15.3 påpekade SSI att SKB inför provdriften behöver kunna visa att man kan genomföra samtliga moment i deponeringen och återfyllningen under realistiska förhållanden och med de maskiner och rutiner som ska användas vid rutinmässig drift.

SKI påpekade även att SKB bör beakta att kvaliteten hos material, hantering, applicering etc kan variera under den långa drifttiden.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Sedan 2004 har maskiner och metoder för att återfylla deponeringstunnlar utvärderats i ett program för återfyllning och förslutning (Baclo). SKB och Posiva genomför programmet tillsammans. En redovisning av teknik för att återfylla tunnarna med block finns i /15-8/. Tunnarna återfylls med blockenheter som har dimensionen 120×80×50 centimeter. Det motsvarar storleken på två block som kan tillverkas med kommersiellt tillgänglig teknik. Blockens dimensioner kommer att anpassas till tunnelns dimensioner när dessa har fastställts. Blocken lastas på ett transportfordon under jord och körs ut till deponeringstunneln. I tunneln överförs blocken till en installationsutrustning, se figur 15-3. Med hjälp av ett installationsverktyg placeras blockenheten i rätt position i tunneln, se figur 15-4. I normalfallet fylls 80 procent av tunnelns tvärsnitt med block och övriga delar med pelletar eller granuler. För att uppfylla funktionsindikatorn (se kapitel 25 i del IV) behöver 90 procent av resterande volym fyllas med den typ av pelletar som hittills använts i försöken i Bentonitlaboratoriet. Den kapacitet som slutförvarsanläggningen i dagsläget dimensioneras för innebär att sex meter deponeringstunnel ska återfyllas per dag.

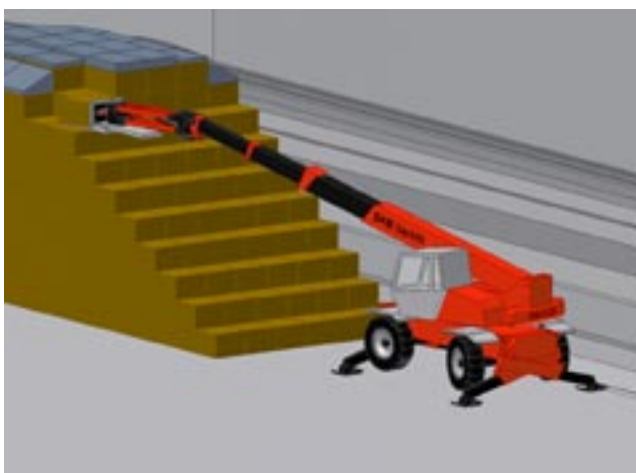
Program

Installationen av hela block av återfyllning i deponeringshålets övre del sker på samma sätt som installationen av buffertblock. Utvecklingen av en utrustning bestående av greppverktyg och kran beskrivs i avsnitt 13.6.

Återfyllningen av avfasningen kräver ett grundligt arbete med att utforma konceptet fram till ansökningarna för slutförvaret enligt kärntekniklagen och för slutförvarssystemet enligt miljöbalken. Praktiska tester kommer att göras i Bentonitlaboratoriet under den kommande treårsperioden.



Figur 15-3. Utrustning för transport och installation av block.



Figur 15-4. Inplacering av block i tunneln med ett installationsverktyg.

Utvecklingsarbetet kommer att fokusera på att ta fram teknik och metoder för att installera block i deponeringstunnlarna enligt ställda krav. Vatteninflödets påverkan på återfyllningen av tunnarna kommer att studeras såväl konceptuellt som genom praktiska försök. Bland annat ska sambandet mellan hur mycket vatteninflöde som kan tillåtas och hastigheten för återfyllning klarläggas. Bentonitlaboratoriet är bland annat byggt för att vi ska kunna simulera vatteninflöde i olika positioner runt en tunnel och olika stora flöden i olika positioner.

Återfyllningsmetoden kommer att testas och demonstreras i full skala i Äspölaboratoriet. De första testerna görs i Bentonitlaboratoriet, där sannolika vatteninflödesscenarier simuleras. Där kommer vi att arbeta både med en mock-up i storleksskala 1:4 och med tester i full storleksskala (1:1).

15.7 Installation av pelletar eller granuler

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisades inte installation av pelletar eller granuler i deponeringstunnlar.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Under perioden har SKB:s samarbete med Posiva lett fram till ett huvudalternativ för återfyllning av deponeringstunnlar som också förordas efter att ha analyserats i SR-Can /15-6/. Detta alternativ för återfyllning av deponeringstunnlar förutsätter att pelletar eller granuler installeras mellan tunnelns vägg och lerblocken. Olika sätt att installera pelletarna eller granulerna testas i en serie försök i bland annat Bentonitlaboratoriet.

Program

Tester av installation av pelletar och granuler i Bentonitlaboratoriet kommer att fortsätta. Målet är att utveckla metoden och utrustningen för installationen så att fyllningsgraden blir hög och jämn och att damningen kan minimeras. Hur olika förhållanden, såsom till exempel punktinflöden av vatten och bergväggens jämnhet, påverkar installationen kommer att utredas.

Testerna och demonstrationerna är en del av arbetet med återfyllningsmetoder som beskrivs i avsnitt 15.6.

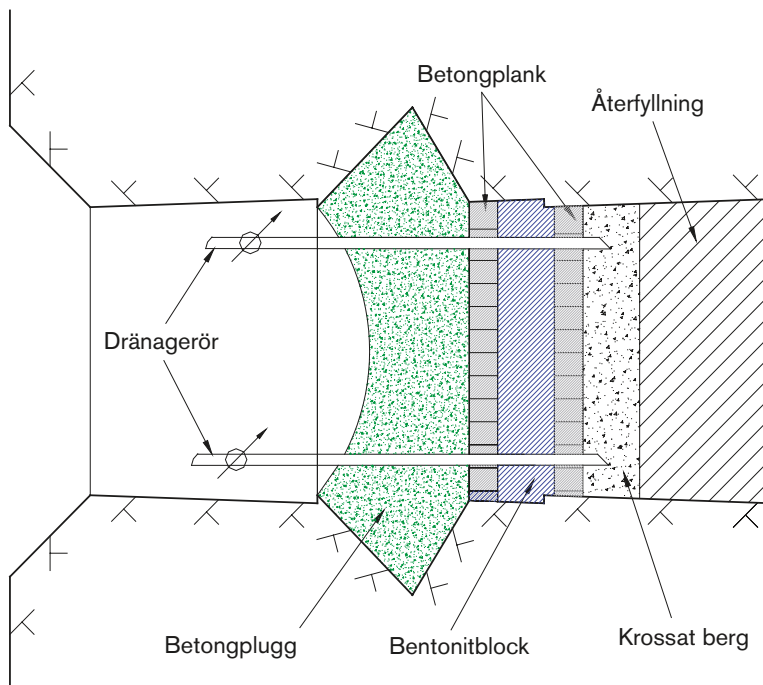
15.8 Installation av en temporär plugg i deponeringstunneln

När alla kapslar i en deponeringstunnel har deponerats återfylls tunneln och pluggas igen. I ett första steg används en temporär plugg, i avvaktan på att övriga utrymmen i undermarksdelen också ska återfyllas. Den temporära pluggen har i sig ingen långsiktig funktion, utan dimensioneras för att klara av att stå emot vattentrycket på försvarsdjup och svälltrycket i återfyllningen. Den ska också vara så tät att de eventuella kanaler i återfyllningen, som bildats under installationen, kan självläka. Den temporära pluggen kommer inte att rivs, utan lämnas kvar när övriga utrymmen försluts.

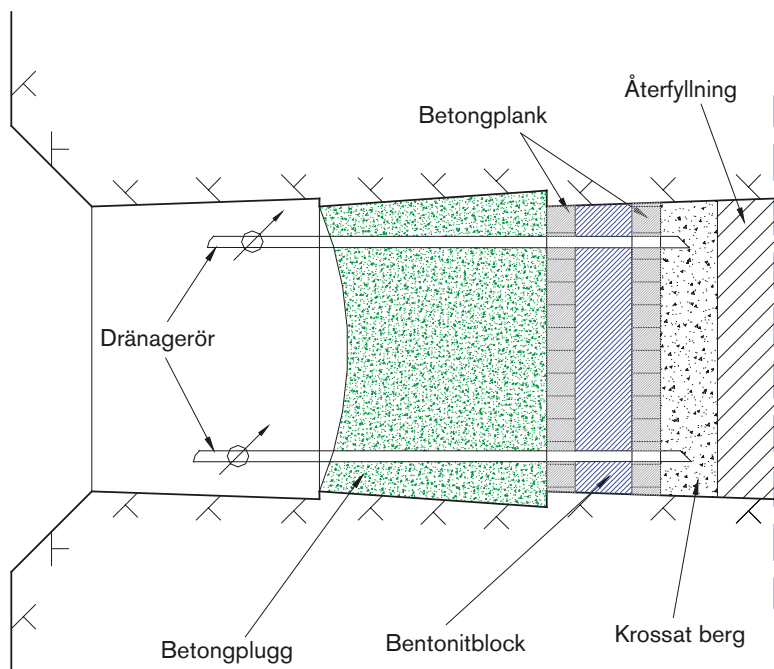
Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 identifierades två typer av pluggar. Den ena typen bygger på en armerad plugg som förankras i en slits i berget runt tunneln, se figur 15-5. Pluggar av denna typ har installerats i Backfill and Plug Test och i Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Den andra typen av plugg är en friktionsplugg, som hålls på plats av friktionen mellan plugg och bergvägg, se figur 15-6.

Vidare konstaterade vi att funktionskrav, tekniska lösningar och metoder för att uppföra pluggar behöver tas fram.



Figur 15-5. Principskiss av en typ av plugg, som bygger på en armerad plugg som förankrats i en slits i berget runt deponeringstunneln.



Figur 15-6. Principskiss av en friktionsplugg, som hålls på plats av friktionen mellan pluggen och bergväggen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Kraven på och utformningen av den temporära pluggen har detaljerats under perioden. De förutsättningar som den fortsatta utvecklingen kommer att baseras på är att pluggen:

- Inte behöver skära av den störda zonen eftersom vi bedömer att vi kommer att använda drivningsteknik, borrhning och sprängning som inte resulterar i en axiellt transmissiv zon längs med tunneln.
- Ska gå att installera även i tunnlar med vatteninflöde på upp till 10 liter per minut.
- Ska motstå svälltryck på upp till 2 MPa och ett vattentryck på upp till 5 MPa.
- Inte får ha axiella sprickor större än 0,1 millimeter (täthetskrav).
- $\text{pH} < 11$ (i lakvattnet från betongen).

Ett antal krav ställs på betongen i pluggen. Den ska till exempel vara av låg-pH-typ, självkompakterande och avge lite värme vid hydratiseringen. SKB har arbetat med utveckling av låg-pH-betong sedan 2004, bland annat inom EU-projektet Esdred och i samarbete med Posiva och Numo /15-9/. Denna utveckling har dock i huvudsak varit inriktad på injekteringsbruk, sprutbetong och betong i pluggar i undersökningsborrhål.

Låg-pH-betong har använts i en fullskalig plugg som har installerats i URL i Kanada inom ramen för ett internationellt projekt "Tunnel Sealing Experiment (TSX)" /15-10/.

Program

Utredningar och tester görs för att ta fram recept på låg-pH-betong, som passar för pluggarna. Speciellt utvärderas vilken eller vilka plastiserare som kan användas och i vilka kvantiteter.

Den förstudie av de två pluggkoncepten, som initierades i slutet av 2006, kommer att fortsätta. Resultatet från studien kommer att användas för att välja referenskoncept. För det valda referenskonceptet planerar SKB att utforma och installera en plugg i full skala i Äspölaboratoriet.

16 Förslutningslinjen

Förslutningslinjen – det vill säga förslutningen av slutförvaret – omfattar återfyllning och pluggning av alla andra utrymmen än deponeringstunnlarna, såsom stamtunnlar, transporttunnlar, centralområde samt ramp och schakt för transport och ventilation. Dessutom ingår förslutning av undersökningsborrhål från ytan och från slutförvarsanläggningens utrymmen. Förslutningslinjen beskriver den hantering, produktion och installation av återfyllning som krävs.

Av färgsättningen av förslutningslinjen framgår för vilka områden som det finns känd och beprövad teknik som kan appliceras på slutförvaret samt för vilka det krävs teknikutveckling, se figur 16-1. Figuren beskriver SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag. För de områden som markerats med grå eller grön färg förutsätts normala projekteringsinsatser räcka för att specificera konstruktion och genomförande av de åtgärder som behövs. I något fall kan verifierande tester vara motiverade. För de områden som markerats med gul eller röd färg behövs teknikutveckling. För flera av de gulmarkerade områdena har studier genomförts, men SKB anser att ytterligare insatser för vidareutveckling eller optimering är motiverade.

16.1 Nuläge

Förslutningen av de övriga utrymmena kommer inte att ske förrän allt använt kärnbränsle har deponerats. Det innebär att förslutningsaktiviteterna ligger ganska långt fram i tiden. Hittills har SKB prioriterat arbetet med återfyllningen av deponeringstunnlarna. Erfarenheterna från dessa studier kommer att användas inom det fortsatta arbetet med att återfylla även övriga utrymmen.

De material som kan bli aktuella vid förslutningen av förvaret är svällande lera, icke svällande lera, bergkross eller kombinationer av nämnda material. Hantering, tillverkning och återfyllning kan i stor utsträckning göras med samma metoder som utvecklas för återfyllningslinjen. För icke svällande leror och bergkross finns även kommersiellt använda metoder. I Stripagruvan testades blandningar av kvartssand och bentonit. Vid försök i Äspölaboratoriet har SKB installerat återfyllning, som består av krossat berg respektive en blandning av krossat berg och bentonit. Olika typer av pluggar kan komma att användas vid installationen av förslutningsmaterial.

Slutförvaret	Tillfarter (schakt/ramp)	Undersökningsborrhål	
Mellanlagring av återfyllning	Mottagning av lera, lerig morän, bergkross, bergblock etc	Tillverkning av svällande återfyllning	Känd och beprövad tillämpning i dag
Rensning och stabilisering	Rensning och stabilisering	Rensning och stabilisering	Känd och beprövad teknik som kan appliceras
Installation av återfyllning	Installation av återfyllning	Installation av svällande återfyllning	Känd och provad teknik som kan appliceras efter tester
Gjutning av pluggar	Installation av intrångshinder	Gjutning av pluggar	Teknik som inte är känd eller tillräckligt utprovad i den tilltänkta användningen
Eftertätning av pluggar		Toppförslutning	

Figur 16-1. Förslutningslinjen – SKB:s bedömning av läget för teknikutveckling i dag.

Undersökningsborrhål från markytan och i själva slutförvaret måste tätas senast i samband med förslutningen av slutförvaret. SKB har studerat och utvecklat flera koncept för att försluta borrhål. Det mest lovande konceptet, bentonit och kvartsbaserad betong, har testats i ett 500 meter djupt borrhål i Olkiluoto i Finland.

På samma sätt som för återfyllningslinjen är det inom förslutningslinjen också viktigt att utreda var gränsen för vatteninflödet går för att vi ska uppfylla kraven på förslutningen. Det är också viktigt att utreda hur förslutningen i schakt och ramp ska utformas, så att nödvändig funktion bibehålls även under och efter nästa istid.

16.2 Krav och förutsättningar

Kraven på återfyllning och pluggning av övriga utrymmen kommer successivt att anpassas efter respektive utrymmens betydelse för radionuklidtransporten från otäta kapslar. Detta kommer att analyseras inom säkerhetsanalysen SR-Site. Slutsatserna kan ge vägledning om hur förslutningen ska utformas. Kraven på återfyllning och pluggar i stamtunnlar i deponeringsområdena förväntas likna dem som gäller för återfyllningen i deponeringstunnlarna, se kapitel 15.

Krav på metoder och utrustning för att återfylla och plugga igen övriga utrymmen har ännu inte specificerats. I dagsläget finns endast krav angivna för den funktion som ska uppnås:

- Förslutningen av transporttunnlarna ska utformas så att återfyllningen i deponeringstunnlarna långsiktigt hålls på plats.
- Förslutningen i de övre delarna av schakt och ramp ska utformas för att klara en period med permafrost.
- Förslutningarna i den allra översta delen av ramp och schakt ska utformas så att de försvårar intrång i slutförvaret.
- Borrhålsförseglingen ska ge en varaktig tätning av borrhålen och hindra axiellt vattenflöde i dem.

Kraven på metoder och utrustning för att installera förslutningen kommer att kunna härledas ur dessa funktionskrav först när konceptet för förslutningen har valts.

16.3 Tillverkning och installation av återfyllning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 gjordes ingen skillnad på återfyllning av deponeringstunnlar och övriga utrymmen i slutförvaret.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Den nyvetenskapen inom detta område kommer från den utveckling som gjorts för att återfylla deponeringstunnlar. Erfarenheter från utveckling, tillverkning och installation av olika återfyllningskoncept i Äspölaboratoriet /16-1, 16-2, 16-3/ kommer att kunna användas vid det fortsatta arbetet.

Program

Förslutningen av slutförvaret ligger så pass långt in i framtiden att det finns tid att avvakta resultatet från teknikutvecklingen av återfyllningen av deponeringstunnlar innan vi fattar beslut om vilka behov av teknikutveckling som finns.

Återfyllningens funktion under kommande istider kommer att utredas. Enligt planerna ska vi i fält studera de processer och de eventuella egenskapsförändringar, som uppstår vid nedfrysning och upptining av återfyllningen. Resultatet kommer att utgöra underlag för att utforma återfyllningen i de yttliga delarna av slutförvaret, där det finns risk för frysning.

16.4 Installation av pluggar

Temporära och permanenta pluggar kan komma att vara viktiga när slutförvarsanläggningen ska förslutas. Inom den aktuella Fud-perioden kommer det mesta av kunskapen om dessa pluggar att genereras från det arbete som görs för att utveckla pluggarna för deponeringstunnlarna, se avsnitt 15.8.

16.5 Förslutning av borrhål

16.5.1 Tätning av borrhål

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Ett program för att identifiera lämplig teknik för att rensa och täta undersökningsborrhål redovisades i Fud-program 2001. Den första etappen utgjordes av en förstudie som låg till grund för det program som SKB presenterade i Fud-program 2004. Målet med programmet var att ta fram funktionskrav och ett komplett koncept, samt att genomföra studier i laboratorium och i fält.

De remisskommentarer som gavs av myndigheterna har inte föranlett några förändringar av programmets inriktning.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har, i samarbete med Posiva, tagit fram koncept för att täta långa och korta borrhål /16-4, 16-5, 16-6, 16-7/. Koncepten ska fungera i både branta och flacka borrhål /16-8/. Konceptet bygger på det som testats i Stripa /16-9/ och använts i SFR.

Det grundläggande konceptet för att försluta långa och korta borrhål innebär att hålen tätas med perforerade kopparrör, som är fyllda med högkompakterad smektitrik lera (typ MX-80). Enligt vår bedömning kan det grundläggande konceptet användas för borrhål med godtycklig orientering.

Dessutom har tre andra metoder för att täta hål studerats:

- Containerkonceptet innebär att ett förslutet rör, som innehåller kompakterad smektitrik lera, placeras i borrhålet. Det förslutna röret isolerar leran från borrhålsvattnet under installationen. När röret befinner sig i rätt position öppnas botten och leran trycks ut. Detta koncept bedömer vi skulle kunna användas för att täta både korta och långa hål.
- Couronnekonceptet innebär att cylindriska bentonitblock, som är uppträdna på en kopparstång, placeras i borrhålet. Detta koncept bedömer vi kan användas i borrhål som är upp till 100 meter långa och som har en godtycklig orientering.
- Pelletkonceptet innebär att högkompakterade pelletar av smektitrik lera (typ MX-80) blåses in direkt i borrhålet. Sannolikt kan detta koncept bara användas i brantstående nedåtriktade hål.

Tillverkning av bentonitblock i de olika koncepten skiljer sig inte nämnvärt åt. Vi har tillräckligt stor erfarenhet av att pressa bentonitblock i denna storlek för att kunna tillverka blocken, oberoende av koncept.

Där borrhålet passerar vattenförande sprickor är risken stor att leran eroderar. Där kan hålen fyllas med silika-betong, som är ett vattengenomsläppligt material. Förutsättningarna för att tätningmaterialet ska förbli mekaniskt stabilt är att cementinnehållet är lågt och ballastmaterialet inert. Kunskapen om att tillverka silika-betong bedöms vara tillräcklig.

Förslutningen i den övre delen av borrhålet, som ofta har en grövre dimension än den nedre delen, ska skydda leran i borrhålet och förhindra att den expanderar uppåt. Vid utformningen av förslutningens övre del måste hänsyn tas till vad den yttre påverkan, som till exempel växlande klimat och bergdeformationer till följd av tektoniska förskjutningar och glaciationer, kommer att innebära. Flera material – såsom sten, grus, sand eller morän – kan användas för att skydda leran. För den mekaniska låsningen har två koncept utvecklats; en plugg som består av betong armerad med kvarts och en expanderande metallplugg.

Program

Forskningsprojektet kommer att drivas vidare under den kommande Fud-perioden. Under de återstående etapperna ska vi tillverka alla de material som krävs för att försluta borrhål och testa dem i befintliga undersökningsborrhål från platsundersökningarna i Finland och Sverige. Målet är att SKB och Posiva tillsammans ska demonstrera förslutning av upp till 1 000 meter djupa borrhål.

16.5.2 Rensning och stabilisering av borrhål

Innan borrhålen kan förslutas måste de rensas från till exempel gammal mätutrustning och utfallet berg. Borrhålet kan även behöva upprymmas till ursprunglig diameter och borrhålsväggarna behöva stabiliseras, speciellt där de passerar svaghetszoner.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Rensning och stabilisering av borrhål redovisades inte i Fud-program 2004.

Nyväunnen kunskap sedan Fud 2004

En sammanställning av de metoder som kan användas för att rensa borrhål har tagits fram av SKB och Posiva. Arbetet har gjorts inom ramen för ett samarbetsprojekt /16-8/. Slutsatsen är att det finns tillgänglig teknik för att rensa borrhål. I dag finns därför inget behov av att bedriva ytterligare utveckling.

SKB och Posiva har utvecklat en metod för att stabilisera borrhål i de områden där de passerar svaghetszoner i berget. Stabiliseringen sker genom att borrhålet utvidgas och fylls med silika-betong. Därefter borrar ett hål genom betongen. Detta har samma diameter som det ursprungliga borrhålet. Metoden har använts i bland annat undersökningshål vid platsundersökningarna och vid tätning av ett djupt borrhål som genomfördes under 2005 i Olkiluoto (KR-24) /16-10/. Metoden fungerar bra och uppfyller de krav på stabilitet som gäller under den korta tid som det tar att installera leran, se även avsnitt 12.3.1.

Program

Den ovan beskrivna metoden för att stabilisera borrhål har fungerat bra, men behöver provas i hål som är djupare än 500 meter. Undersökningshålen i Olkiluoto, Forsmark och Oskarshamn kommer att gå igenom ur ett förslutningsperspektiv. En geologisk karakterisering av hålen planeras också. Därefter kommer behovet av framtida stabilisering att sammanställas och lämpliga testobjekt under 500 meters djup att identifieras. Det fortsatta arbetet med stabiliseringsteknik i nya undersökningshål beskrivs i avsnitt 12.3.1. Resultaten kommer vi att utvärdera fortlöpande, med tanke på att tekniken också ska kunna användas i djupa undersökningshål från markytan.

Injektering av svaghetszoner med finkornig silika-cement är en annan möjlighet för att stabilisera svaghetszoner. Utvecklingen av injekteringstekniken kommer att ske samordnat med utvecklingen av tekniken för injektering av tunnlar, se avsnitt 12.4.

17 Återtag

Slutförvaret för använt kärnbränsle ska utformas på ett sådant sätt att det inte behöver övervakas. Om framtida generationer skulle vilja ta upp bränslet igen är detta fullt möjligt. Under slutförvarets provdrift kommer ett mindre antal kapslar att deponeras. Verksamheten utvärderas regelbundet. Om utvärderingen ger ett positivt resultat fortsätter deponeringen under den rutinmässiga driften. Om resultatet inte blir positivt skulle det kunna bli aktuellt att frilägga och ta upp kapslarna igen. Ett återtag kräver tillstånd enligt kärntekniklagen.

Hur en kapsel tas tillbaka beror på när beslutet fattas. Ju längre tid som gått efter deponeringen, desto svårare blir det att avlägsna bufferten och frilägga kapslarna. De tekniska svårigheterna beror av hur hög vattenmättnadsgrad – och därmed också hur högt svälltryck – den omgivande bufferten har. En annan svårighet är strålningen från bränslet, vilket gör att strålskärning kommer att krävas vid arbetet. När bentoniten har avlägsnats kan kapseln lyftas upp ur deponeringshålet och hanteras strålskärmat med deponeringsmaskinen. SKB har demonstrerat att det är möjligt att ta tillbaka kapslar under driftskedet vid ett försök i Äspölaboratoriet. Den metod som SKB utvecklat ger den strålskärning som erfordras. Den största arbetsinsatsen och de högsta kostnaderna uppkommer vid ett återtag efter att förvaret förslutits.

17.1 Nuläge

SKB har tidigare studerat och utvärderat olika metoder för att frilägga kapslarna från bentonitbufferten /17-1/:

- Mekaniska metoder där bentoniten bearbetas bort genom till exempel borring.
- Hydrodynamiska metoder där bentoniten spolats bort med vatten.
- Termiska metoder där kapselns mantelyta friläggs genom uppvärmning eller kylning.
- Elektriska metoder där bentoniten närmast kapselns mantelyta krymper med hjälp av elektrisk ström för att skapa en spalt mellan kapseln och bufferten.

Av ovanstående metoder bedömdes den hydrodynamiska ha högst utvecklingspotential. Denna har provats i Äspölaboratoriet, dels vid det så kallade uppslammningsförsöket (som föregick Återtagningsförsöket) och dels vid brytningen av Återtagningsförsöket. Den hydrodynamiska metoden kan vara tidskrävande, men inga större svårigheter har observerats. Metoden består av två delar; uppslammning av bentonitbufferten och avvattnings av genererat slam, se figur 17-1. Installationen av Återtagningsförsöket beskrivs i /17-2/.



Figur 17-1. Demonstration av friläggningen av en kopparkapsel med den hydrodynamiska metoden i Äspölaboratoriet. Till vänster visas uppslammningen av bentonitbufferten och till höger visas utrustningen för avvattnings.

17.2 Krav

I Sverige finns inget formellt krav på att det ska vara möjligt att återta deponerade kapslar efter förslutningen av förvaret. Att återta kapslar räknas som kärnteknisk verksamhet. För att ett återtag ska kunna genomföras krävs därför tillstånd enligt kärntekniklagen.

SKB har däremot formulerat ett eget krav på att slutförvaret ska utformas på ett sådant sätt att det är möjligt att ta tillbaka deponerade kapslar före förslutning. Detta får dock inte leda till tekniska utformningar som gör att förvarets långsiktiga funktion försämras. Enstaka kapslar kan behöva tas upp ur ett deponeringshål om något oförutsett inträffar under deponeringen. Att ta tillbaka ett större antal kapslar i ett senare skede av driften av förvaret ska också vara möjligt. Om en annan metod för att ta hand om eller ta vara på det använda bränslet föredras i framtiden behövs även då teknik för att ta tillbaka kapslar.

17.3 Friläggning av kapsel

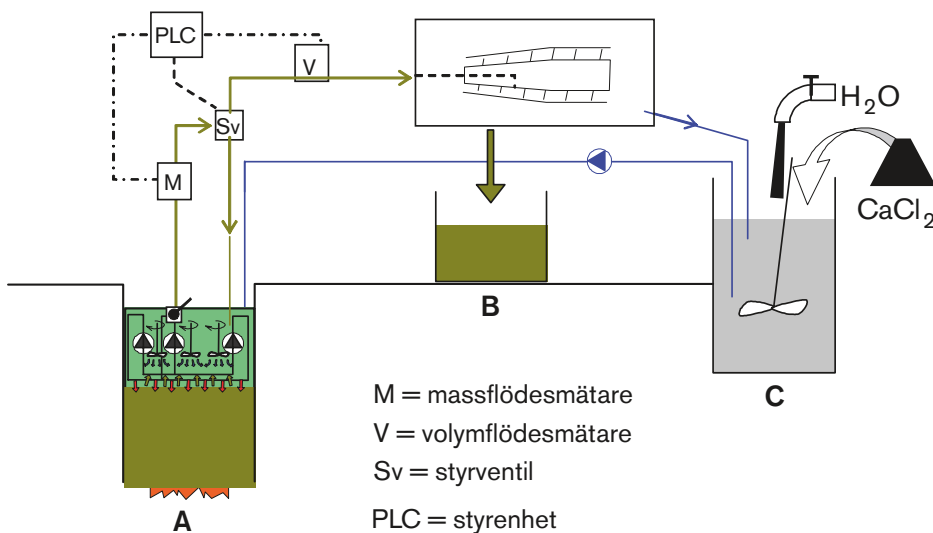
Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisade SKB att en genomförd friläggning av en kapsel i naturlig storlek med en provisorisk utrustning i Äspölaboratoriet är möjlig. Försöket bekräftade att den hydrodynamiska metoden är en lovande metod, som fortsättningsvis bör utvecklas och testas.

Kasam påpekar i sin granskning att förvaret bör byggas så att bränslet kan återtas med hänsyn till eventuella framtida framsteg inom exempelvis transmutationstekniken. Dessutom måste säkerheten vid ett eventuellt återtag belysas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Den hydrodynamiska metoden har utvecklats och provats i full skala vid rivningen av Återtagsförsöket i Äspölaboratoriet /17-3/. Vid detta försök löstes cirka hälften av buffertmaterialet upp, medan resten bröts mekaniskt för att det skulle kunna undersökas inom ramen för andra studier. I figur 17-2 ges en schematisk beskrivning av friläggningsutrustningen.



Figur 17-2. Schematisk illustration av friläggningsutrustningen. (A) deponeringshålet med saltlösning ovanför bentonitbufferten och med uppsamlingsutrustningen i arbetsposition. (B) dekantern med utsläpp av avvattnad bentonit och klarväska. (C) kär för uppsamling av klarväska och tillredning samt kontroll av saltlösning.

Den genomförda friläggningen av kapseln i Återtagsförsöket visade att den valda hydrodynamiska metoden fungerar bra och har följande fördelar:

- Den simultana kemiska och mekaniska påverkan på bufferten eroderar den kompakterade bentoniten. Metoden kan tillämpas i en kontinuerlig process.
- Saltlösningen fungerar som strålskydd, förutom att erodera respektive slamma upp bentoniten.
- Risken för skador på kapseln är mycket liten.
- Känsligheten för kapselns position i deponeringshålet är liten.
- Det behövs inga utrymmeskrävande lastbärande eller positionerande konstruktionsdelar (jämfört med en utrustning som skulle arbeta med någon form av mekanisk friläggningsteknik).

Program

Inga ytterligare storskaliga tester planeras under den nu aktuella Fud-perioden.

17.4 Avvattning av genererat slam

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisade SKB att en genomförd friläggning av en kapsel i naturlig storlek med en provisorisk utrustning i Äspölaboratoriet är möjlig.

Nyväunnen kunskap sedan Fud 2004

Avvattning med dekantercentrifug i en kontinuerlig process har genomförts i full skala vid Äspölaboratoriet. Bentonit-slurryn, som genererades vid friläggningen av kapseln i Återtagsförsöket i Äspölaboratoriet, avvattnades med mycket gott resultat i en stor dekantercentrifug, se figur 17-3.

Program

Inga insatser planeras under programperioden.



Figur 17-3. Avvattnad bentonit från dekantern.

18 Alternativ förvarsutformning – KBS-3H

KBS-3-metoden gör det möjligt att deponera kapslarna vertikalt (KBS-3V) eller horisontellt (KBS-3H). I båda varianterna omges kapseln av en buffert av bentonit, se figur 18-1. I KBS-3H behövs inga deponeringstunnlar, utan de långa horisontella deponeringshålen borraras direkt från stamtunneln. Detta innebär att en betydlig mindre bergvolym behöver tas ut än vid vertikal deponering. Den del av slutförvarsanläggningen som ligger ovan mark påverkas inte av om kapslarna deponeras horisontellt eller vertikalt.

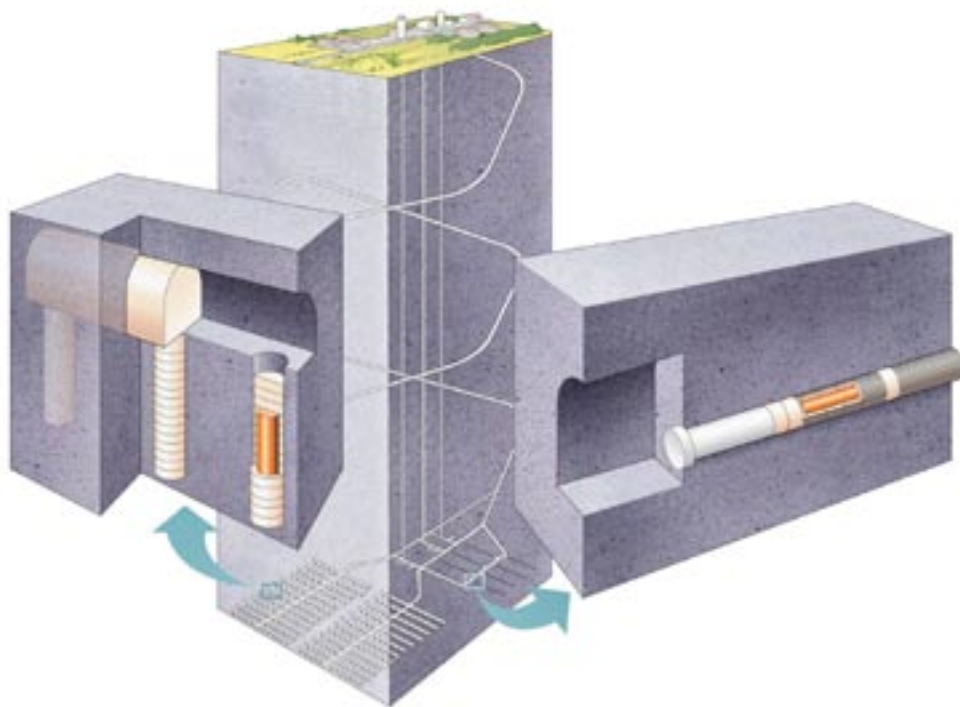
SKB utredde horisontell placering av kapslar i ett slutförvar redan tidigt 1990-tal /18-1, 18-2/. Under 2001 publicerades ett forsknings-, utvecklings-, och demonstrationsprogram för KBS-3H /18-3/ för att utreda om horisontell deponering kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering.

18.1 Nuläge

SKB och Posiva samarbetar sedan 2002 för att genomföra det forskningsprogram som SKB publicerade 2001. Programmet, som kommer att avslutas under 2007, omfattar utformning av förvarets komponenter och en generell förvarslayout. En demonstration av deponeringsutrustning i full skala av KBS-3H genomförs i Äspölaboratoriet. Inför denna har den utrustning som behövs utformats och tillverkats. Detta arbete sker inom ramarna för EU-projektet Esdred i sjätte ramprogrammet. Två horisontella deponeringshål har borrats i Äspölaboratoriet. Dessa används för att demonstrera deponeringsförfarandet och andra aktiviteter, såsom injektering och pluggning. Deponeringsutrustningen levererades 2006. Efter diverse modifieringar kunde den tas i drift och demonstrationen påbörjades i början av 2007.

Programmet för KBS-3H omfattar också en säkerhetsanalys för ett tänkt förvar i Olkiluoto. Analysen genomförs av Posiva.

I slutet av 2007 ska resultaten från de olika aktiviteterna i programmet rapporteras. Genomförbarhet och långsiktig säkerhet ska då utvärderas. Baserat på denna rapportering och utvärdering kommer SKB sedan att fatta beslut om huruvida KBS-3H ska utvecklas vidare.



Figur 18-1. KBS-3-förvaret med vertikal (KBS-3V) respektive horisontell deponering (KBS-3H).

18.2 Utformning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisades en utformning av ett KBS-3H-förvar. Utformningen baserades på att cirka 300 meter långa, svagt lutande, deponeringstunnlar borrar från stamtunneln. I tunnlar deponeras kapslarna omgivna av en bentonitbuffert och en perforerad stålbehållare, den så kallade supercontainern.

För att deponera paketen i deponeringstunnlarna behövs en deponeringsmaskin. Utvecklingen av deponeringsmaskinen och annan utrustning pågår. Enligt planerna ska deponeringsmaskinen utnyttja vattendrivna kuddar för att minska friktionen mot berget i deponeringstunneln när supercontainern placeras in.

Mellan varje paket ska det finnas ett distansblock av bentonitlera för att täta tunneln, så att vattenflödet längs tunneln förhindras och för att inte temperaturen i bufferten ska bli för hög. En betongplugg ska installeras i deponeringstunnelns mynning. Pluggen ska hålla supercontainrar och distansblock på plats tills stamtunneln återfylls. Deponeringstunnlarna kan ha ett inbördes avstånd av 25–40 meter, beroende på bergets egenskaper.

Konceptet bedömdes ha flera osäkerheter och problemställningar, såsom kanalbildning i buffertmaterialet, stränga krav på vatteninflödet till deponeringstunneln, heterogen vattenmättnad och sprickbildning i distansblocken.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Utformningen av KBS-3H har vidareutvecklats sedan Fud-program 2004. Bland annat har tester av hur vattenflöden längs deponeringstunneln påverkar bufferten studerats i laboratorieskala /18-4/.

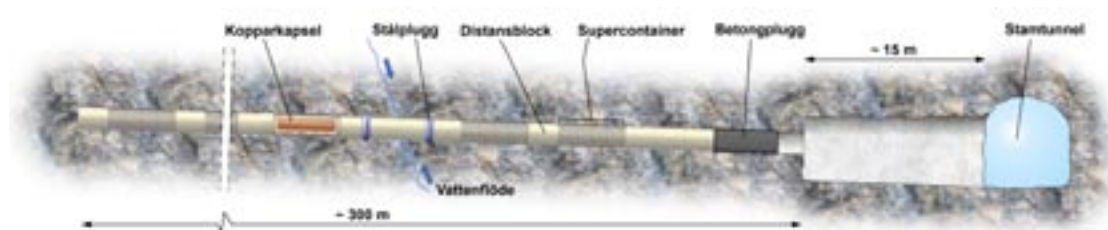
För att förhindra att stora mängder vatten kommer in till deponeringshålet via vattenförande sprickzoner kommer dessa att skärmars av. Avskärmningen åstadkoms genom att stålpluggar placeras på båda sidorna om sprickzoner i deponeringstunneln. Stålpluggarna dimensioneras för att motstå det hydrostatiska trycket på 400–500 meters djup och bentonitens svälltryck. Stålpluggarna och övriga komponenter i ett KBS-3H-förvar framgår av figur 18-2.

Grundkonstruktionen för deponeringsutrustningen togs fram under 2003 och rapporterades i /18-5/. Detta arbete utgör basen för detaljkonstruktionen och tillverkningen av deponeringsutrustningen.

Dessutom har en så kallad megamanschett utvecklats, för efterinjektering av de borrade deponeringstunnlarna, för att man ytterligare ska kunna reducera vatteninflödet.

Program

Om beslutet blir att KBS-3H ska vidareutvecklas kommer ett program för detta att utarbetas. Här redovisas, så långt det är möjligt, de utvecklingsfrågor som vi redan i dag bedömer blir viktiga för att KBS-3H ska nå en likvärdig teknisk nivå som KBS-3V. De programpunkter som tas upp nedan, ska om det blir aktuellt, kunna genomföras under de kommande sex åren.



Figur 18-2. Principen för utformningen av ett KBS-3H-förvar.

Utformningen av KBS-3H kommer att studeras mera i detalj. Det gäller till exempel de stålpluggar som ska skärma av de vattenförande zonerna och distansblocken av buffertmaterial. Dessutom ska olika sätt att hantera vatteninflöden genom dränering utvecklas. Hanteringen av vatteninflödet beror också av den verkliga frekvensen av – och egenskaperna hos – sprickorna på den aktuella platsen för slutförvaret. Layoutstudier i både Forsmark och Laxemar behöver därför göras. Sådana studier utgör även ett underlag för att bedöma vilka bergspänningar vi måste ta hänsyn till, hur stor risken för spjälkning är och hur den störda zonen runt deponeringstunnlarna kan karakteriseras.

Att utreda hur logistiken vid deponering ska utformas är viktigt för att säkra kvaliteten vid deponeringen. En betydelsefull frågeställning är hur lång tid som får passera mellan deponeringen av två supercontainrar, samt hur lång tid det får ta från den tidpunkt då man deponerat den sista supercontainern i en deponeringstunnel tills att tunneln pluggas.

För att kunna hantera felhändelser under deponeringssekvensen måste dessa först identifieras och analyseras. Med utgångspunkt från resultatet av analysen kan de åtgärder som behövs beskrivas och utrustning utvecklas.

Andra material än stål i supercontainern kommer att studeras. Det gäller även andra buffertmaterial. Dessutom kommer hanteringen av buffert och kapsel utan supercontainer att utvärderas.

Hur stora vatteninflöden som kan tillåtas till deponeringstunneln för att buffertens kvalitet fortfarande ska kunna säkerställas är – på samma sätt som för deponeringshålen i KBS-3V – en viktig fråga. Detta kan följaktligen komma att utredas gemensamt för de två alternativen.

18.3 Demonstration i Äspölaboratoriet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

En demonstration av KBS-3H i full skala planerades i Äspölaboratoriet på 220 meters djup. Förberedande arbeten i form av borrhning av undersökningsborrhål och utsprängning av en nisch där all utrustning ska placeras hade påbörjats.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Två horisontella deponeringstunnlar har borrats /18-6/. En tunnel är 15 meter lång och används för att testa förvarets komponenter på olika sätt. En ändplugg av sprutbetong med lågt pH har till exempel byggts och testats i denna tunnel. Den andra tunneln är 95 meter lång och används huvudsakligen för att demonstrera deponeringsutrustningen och injektering med megamanschetten.

Vid borrhningen av tunnlar användes horisontell, omvänd stigortsborrhning. Ett pilothål borras, varefter tunneln rymdes upp till full diameter /18-6/. Noggrann kontroll av styrningen vid borrhningen av pilothålet gjorde att de stränga kraven på att tunneln ska vara rak kunde uppnås.

Komponenterna till två fyllda supercontainrar (kapsel, buffertblock och ringar samt en perforerad stålbehållare) tillverkades och monterades samman till två paket under 2005. För att kunna genomföra demonstrationen av deponeringen har bufferten tillverkats av betong. Bentonit kunde inte användas, eftersom den kommer att börja svälla i den fuktiga miljön i Äspölaboratoriet och paketet måste fungera under hela den tid som försöket pågår. Betongen har samma densitet och tryckhållfasthet som bentonit för att efterlikna de verkliga förhållandena i vikt och till viss del även hållbarhet.

Ett franskt företag har tillverkat den deponeringsutrustning som levererades och installerades i Äspölaboratoriet under 2006. Efter diverse modifieringar, bland annat för att åtgärda instabilitet hos utrustningen och dålig funktion hos de vattendrivna lyftkuddarna, kunde utrustningen godkännas (site acceptance test – SAT) i februari 2007. Figur 18-3 visar utrustningen.

En sprutbetongplugg med lågt pH har installerats i den 15 meter långa deponeringstunneln. Arbetet genomfördes inom ramen för EU-projektet Esdred. Testet visade att det var svårt att få bra vidhäftning mellan pluggen och bergytan.



Figur 18-3. KBS-3H – deponeringsutrustning i Äspölaboratoriet på 220 meters djup.

Program

Huruvida KBS-3H-konceptet ska utvecklas vidare kommer SKB att besluta om i slutet av 2007. Under förutsättning att arbetet med KBS-3H ska drivas vidare planeras följande:

Under förutsättning att det fortsatta arbetet med utformningen av metoden resulterar i lovande lösningar, kommer SKB att successivt överväga hur tillförlitliga fältdata ska kunna erhållas.

I den befintliga nischen och deponeringstunnlarna på 220 meters djup kommer vi att kunna testa utrustning för hantering och deponering, samt genomföra installationstester med stålplugg, distansblock och dräneringslösningar.

Vi bedömer också att det finns ett behov av långtidstester för att studera stålpluggarnas funktion. Ett annat område som behöver studeras ytterligare genom långtidstester är hur sådana material, som är speciella för KBS-3H, påverkar till exempel buffertens funktion.

Vissa studier kommer att behöva genomföras vid högre grundvattentryck och högre bergspänningar. Detta gäller undersökningar av vilka egenskaper berget får runt de borrhade deponeringstunnlarna, hur stor spjälkning blir och hur berget kan tätas på detta djup. SKB bedömer, i likhet med SKI, att en prototyp av ett KBS-3H-förvar behöver installeras i en realistisk slutförvarsmiljö. Om ett sådant steg tas kan installationen förläggas till den djupare delen av Äspölaboratoriet. Enligt nuvarande bedömning kan installationen genomföras inom den kommande sexårsperioden.

18.4 Långsiktig säkerhet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

En preliminär säkerhetsbedömning av KBS-3H har genomförts och granskats av internationella experter. Slutsatsen från denna granskning var att kraven på långsiktig säkerhet bedömdes kunna bli uppfyllda /18-7/.

En preliminär säkerhetsanalys för KBS-3H genomförs under ledning av Posiva. Säkerhetsanalysen utnyttjar den metodik som utvecklas för SR-Can och även de erfarenheter som finns hos Posiva. Analysen görs för ett slutförvar i Olkiluoto och platsdata därifrån kommer att användas.

I granskningen av Fud-program 2004 påpekade SKI att den planerade säkerhetsanalysen för ett slutförvar i Olkiluoto inte kommer att ge alla svar som behövs för att utvärdera säkerheten under svenska förhållanden, till exempel betydelsen av de höga bergsspänningarna i Forsmark.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

KBS-3H är till många delar väldigt likt KBS-3V. Detta gäller till exempel det använda bränslet, kopparkapseln, bentonitbufferten samt förhållandena i geosfären och biosfären. Endast de väsentliga skillnaderna mellan KBS-3H och KBS-3V kommer därför att utredas i detalj i säkerhetsanalysen. Specifikt för KBS-3H är främst att:

- Deponeringstunnlarna är långa och det finns risk för att man får kanalbildning och erosion av buffert och distansblock innan bentoniten har blivit vattenmättad.
- KBS-3H har fler komponenter av stål. Dessa kommer att korrodera och bilda gas. Järnet kan också komma att påverka bentonitens fysikaliska och kemiska egenskaper.

Program

Posiva kommer att slutföra en preliminär säkerhetsanalys för KBS-3H (KBS-3H Safety Case 2007) under 2007. Under förutsättning att arbetet med KBS-3H ska drivas vidare kommer denna analys att kompletteras med en platsspecifik säkerhetsanalys för den plats SKB väljer för KBS-3V. Utformningen och omfattningen av analysen kommer att planeras först när SR-Site genomförs. Analysen kommer i möjligaste mån att bygga på SR-Site och kompletterande analyser av skillnaderna mellan de olika koncepten. Syftet är att kunna jämföra säkerheten hos de två alternativen.

Del IV

Säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning

- 19 Översikt – säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning
- 20 Säkerhetsanalys
- 21 Klimatutveckling
- 22 Bränsle
- 23 Kapseln som barriär
- 24 Buffert
- 25 Återfyllning
- 26 Geosfär
- 27 Biosfär
- 28 Andra metoder

19 Översikt – säkerhetsanalys och naturvetenskaplig forskning

Att slutförvaret för använt kärnbränsle uppfyller kravet på långsiktig säkerhet prövas med hjälp av en säkerhetsanalys, som beskriver förvarets begynnelsestillstånd och kartlägger de tänkbara förändringarna på lång sikt. Med ledning av detta beskriver analysen sedan konsekvenserna för människa och miljö. Säkerhetsanalysen använder en vetenskaplig metodik och hämtar kunskap om långsiktiga förändringar från forskningen. Resultatet av analysen redovisas i en säkerhetsrapport.

SKB:s naturvetenskapliga forskningsprogram spänner över två områden:

- Långsiktig säkerhet
- Andra slutförvaringsmetoder än KBS-3

Det största området är forskning om långsiktig säkerhet. Detta är direkt inriktat på att förse SKB:s säkerhetsanalyser av slutförvaret för använt bränsle med underlag. Den senaste analysen kallas SR-Can och säkerhetsredovisningen lämnades in till myndigheterna den 1 november 2006 /19-1/. SR-Can har varit vägledande för att planera forskningsprogrammet. Genom att identifiera och pröva viktiga processer i förvaret och dess omgivning kan de relevanta forskningsområdena identifieras.

SKB följer utvecklingen av två andra metoder för att ta hand om använt bränsle: separation och transmutation samt djupa borrhål. Detta redovisas i kapitel 28. Säkerhetsanalys och forskning inriktad på låg- och medelaktivt avfall behandlas i del VI av detta Fud-program.

19.1 Säkerhetsanalys

Kapitel 20 ger först en överblick av den metod som användes i den nyligen rapporterade säkerhetsanalysen SR-Can. Därefter beskrivs hur metoden kommer att modifieras för den kommande säkerhetsanalysen SR-Site, som ska ligga till grund för ansökan om slutförvaret. Stora delar av metodiken som användes i SR-Can anses som mogna och kommer att återanvändas i SR-Site. I december 2007 kommer myndigheternas rapport från granskningen av SR-Can. Den blir en viktig utgångspunkt när det gäller att lägga fast den slutliga metodiken för SR-Site.

Kapitel 20 beskriver också status och utvecklingsprogram för en del verktyg för integrerad modellering inom säkerhetsanalysen.

Arbetet inom säkerhetsanalysen är koncentrerat på förvarskonceptet KBS-3V. Horisontell deponering av kapslarna (KBS-3H) studeras också, men den långsiktiga säkerheten för KBS-3H analyseras under ledning av Posiva. Målet är att Posiva ska presentera en preliminär säkerhetsanalys med Olkiluoto som referensplats år 2007. Detta behandlas i del III, avsnitt 18.4.

19.2 Forskning om långsiktig säkerhet

SKB:s forskning om långsiktig säkerhet är framför allt inriktad på processerna (förändringarna på lång sikt) som förekommer i ett slutförvar och hur de påverkar förvarets förmåga att isolera det använda kärnbränslet. Klimatets inverkan på förvaret är av övergripande natur. Vi har därför valt att inleda med ett kapitel som beskriver den forskning som SKB bedriver inom området (kapitel 21). Av myndigheternas föreskrifter framgår det att inverkan av en istid på ett slutförvar ska belysas. SKB:s klimatprogram är därför inriktat på detta.

I kapitel 22 till 26 följer detaljerade redovisningar av programmen för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning och geosfär. För varje förvarsdela diskuteras först eventuella forsknings- och utvecklingsbehov för initialtillståndet. Efter diskussionen om forsknings- och utvecklingsbehovet för initialtillståndet behandlas samtliga processer. Processerna är indelade i strårelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C) samt processer relaterade till radionuklidtransport. I vissa fall är en behandling av enskilda processer inte tillräcklig för att förstå utvecklingen. Därför har uppsättningen av processer ibland kompletterats med beskrivningar som karakteriseras som integrerade studier.

Tabell 19-1 visar alla processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten och som behandlas i kapitel 22 till 26. Motsvarande information för initialtillståndet finns i tabell 19-2. Färgkoden ger en grov uppfattning om storleken av de planerade insatserna under den kommande treårsperioden för respektive process. Forskningsinsatser som är speciellt viktiga för kommande säkerhetsanalyser motiverar stora insatser och återfinns därför ofta bland de rödmarkerade. I samband med granskningen av Fud-program 2004 efterfrågade SSI en tydligare identifiering av de viktigaste forskningsfrågorna inom varje område, med hänsyn till deras betydelse för det långsiktiga strålskyddet och för att genomföra de olika stegen i kärnbränsleprogrammet. Tabellerna 19-1 och 19-2 är avsedda att ge en viss vägledning i detta. All forskning som SKB bedriver om processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten ska vara betydelsefull i så måtto att resultatet skulle kunna innebära en avgörande skillnad vid bedömningen av säkerheten, i positiv eller negativ bemärkelse. Inför de olika stegen i slutförvarsprogrammet måste emellertid vissa frågor vara avklarade eller i varje fall kommit så långt att man kan vara överens om att gå vidare med det övergripande programmet. Detta behandlades i Ansökansplanen /19-2/ som lämnades in augusti 2006.

Kapitel 27 presenterar SKB:s forskningsprogram för biosfären. Detta redovisas med ett något friare format än för övriga delar. Processerna är för många för att användas som utgångspunkt för framställningen utan att tappa överblicken. Formatet följer i stället i stort sett det ekosystembaserade angreppssätt som kommer att användas vid SR-Site.

Utgångspunkten för redovisningen av forskningsprogrammet är KBS-3V. För KBS-3H är många processer gemensamma när det gäller långsiktig säkerhet. Det innebär att resultaten från undersökningar som startas med tanke på KBS-3V också går att använda för KBS-3H. Även det omvända förekommer, se avsnitt 23.2.8, 24.2.8, 24.2.9 och 24.2.11.

19.2.1 Klimatutveckling

Variationerna i jordens klimat gör att vi inte kan utesluta en eller flera istider i det tidsperspektiv på hundratusentals år som slutförvarets säkerhet måste studeras. SKB har därför studerat klimatutveckling och klimatrelaterade processer för att kunna definiera ett antal relevanta klimatscenarioer, som kan användas i säkerhetsanalysen. Säkerhetsanalysen SR-Can har utvärderat betydelsen av klimatrelaterade förhållanden under olika nedisningsscenarioer, inklusive ett referensscenario baserat på den senaste nedisningen. Resultaten visar att händelseförloppen under perioder av inlandsis och permafrost kan tänkas påverka både berget och de tekniska barriärerna under olika omständigheter. Hydrauliskt tryck och grundvattensammansättning kan förändras ner mot förvarsdjup. Dessutom kan permafrost påverka framför allt de delar av förvaret där schakt och tunnlar når markytan. Istidsscenarioet i SR-Can har därigenom påverkat forskningsprogrammet för främst buffert och bränsle. Inför SR-Site startar nya forskningsprojekt, som ska ge en tydligare bild av klimatförhållandena och klimatrelaterade processer i anslutning till glaciala cykler och framtida klimat. Programmet kommer till exempel att fortsätta undersöka hur islasten kan tänkas variera (se avsnitt 21.2), hur havsytans nivå förändras med tiden (se avsnitt 21.3), utbredningen och påverkan av permafrost (se avsnitt 21.4) samt utökas med nya studier för att öka förståelsen för de mer extrema klimatscenarioer som behöver analyseras i säkerhetsanalysen (se avsnitt 21.5).

19.2.2 Bränsle

Om isoleringen bryts och grundvatten tränger in i kapseln kommer radionuklider att frigöras från det använda bränslet. Upplösningen av bränslet är därför en viktig process i säkerhetsanalysen. SR-Can utredde ett scenario där smältvatten från en inlandsis antogs skada bufferten runt en del av kapslarna, vilket i sin tur ledde till ett fall där isoleringen bröts på grund av ökad korrosion.

Tabell 19-1. Forskning om långsiktig säkerhet.

	Kod:		Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod	
	Stora insatser	Måttliga insatser		
Bränsle	Kapsel	Buffert	Aterfylning	Geosfär
R	Radioaktivt sönderfall 22.2.2 Stråldämpning/värmealstrång 22.2.3 Inducerad fission (kriticitet) 22.2.4	Stråldämpning/värmealstrång 24.2.2	Stråldämpning/värmealstrång 25.2.3	
T	Värmetransport 22.2.5	Värmetransport 23.2.3	Värmetransport 24.2.3 Frysning 24.2.4	Värmetransport 25.2.4 Frysning 25.2.5
H	Vatten/gastransport 22.2.6	Värmetransport omättad 24.2.5 Vattentransport mättad 24.2.6	Vattentransport omättad 25.2.6 Vattentransport mättad 25.2.7	Grundvattenströmning 26.2.3
M	Deformation insats 23.2.4 Yttre deformation Cu 23.2.5 Inre deformation Cu 23.2.7	Gastransport/gaslösning 24.2.7 Piping/erosion 24.2.8 Svällning 24.2.9	Gasströmning/gaslösning 25.2.8 Piping/erosion 25.2.9 Svällning 25.2.10	Gasströmning/gaslösning 26.2.4 Rörelser i intakt berg 26.2.5 Reaktivering (jordskalv) 26.2.7 Sprickbildning 26.2.8 Tidsberoende deformationer 26.2.9 Termisk rörelse 26.2.6
C	Termisk expansion/kapslingsbrott 22.2.7 Advektion/diffusion 22.2.8 Restgasradiolys/syrabildning 22.2.9 Vattenradiolys 22.2.10 Metallkorrosion 22.2.11 Bränsleupplösning 22.2.12 Lösning gapinventarium 22.2.13 Speciering radionuklider/kolloid-bildning 22.2.14 Heliumproduktion 22.2.15	Termisk expansion 23.2.6 Korrosion insats 23.2.8 Galvanisk korrosion 23.2.9 Spänningskorr insats 23.2.10 Strålpåverkan 23.2.11 Kopparkorrosion 23.2.12 Spänningskorr hölje 23.2.13 Korn tillväxt koppar 23.2.14 HMC utveckling skadad kapsel 23.2.16	Advektion 24.2.12 Diffusion 24.2.13 Osmos (salteffekt) 24.2.14 Jonbyte/sorption 24.2.15 Montmorillonitomvandling 24.2.16 Lösning/fällning förening 24.2.17 Kolloidfrigoelse/erosion 24.2.18 Strålinducerad montmorillonit-omvandling 24.2.19 Radiolys porvatten 24.2.20 Mikrobiella processer 24.2.21 THM utveckling omättad 24.2.11	Advektion/blandning 26.2.11 Diffusion 26.2.13 Reaktioner med berget 26.2.15 Lösning/fällning sprickmineral 26.2.16 Mikrobiella processer 26.2.18 Oorganisk nedbrytning 26.2.19 Kolloidomsättning 26.2.20 Gasbildning/gaslösning 26.2.22 Metanisomsättning 26.2.23 Saltutfrysning 26.2.24 HC utveckling 26.2.25
Integration				
Radionuklidtransport		Advektion 24.2.22 Diffusion 24.2.23 Sorption 24.2.24 Speciering 24.2.25 Kolloidtransport 24.2.26	Advektion 25.2.22 Diffusion 25.2.23 Sorption 25.2.24 Speciering 25.2.25	Advektion/blandning 26.2.12 Diffusion 26.2.14 Sorption 26.2.17 Speciering 22.2.14 Kolloidtransport 26.2.21 Gastastransport 26.2.4 RN-transport geosfär 26.2.26

Tabell 19-2. Forskning om förvarets initialtillstånd.

Bränsle	Kapsel	Buffert	Aterfyllning	Geosfär
Geometri 22.1.2	Geometri 23.1.2	Geometri 24.1.2	Geometri 25.1.2	
Strålintensitet 22.1.3	Strålintensitet 23.1.3	Porgeometri 24.1.3	Porgeometri 25.1.3	
Temperatur 22.1.4	Temperatur 23.1.4	Strålintensitet 24.1.4	Strålintensitet 25.1.4	
Hydrovariabler 22.1.5	Mekaniska spänningar 23.1.5	Temperatur 24.1.5	Temperatur 25.1.5	
Mekaniska spänningar 22.1.6	Materialsammansättning 23.1.6	Smekthalt 24.1.6	Smekthalt 25.1.6	
Totalt radionuklidinventarium 22.1.7		Vattenhalt 24.1.7	Vattenhalt 25.1.7	Platsundersökningar
Gapinventarium 22.1.8		Gashalter 24.1.8	Gashalter 25.1.8	
Materialsammansättning 22.1.9		Hydrovariabler 24.1.9	Hydrovariabler 25.1.9	
Vattensammansättning 22.1.10		Svälltryck 24.1.10	Svälltryck 25.1.10	
Gassammansättning 22.1.11		Smektitammansättning 24.1.11	Smektitammansättning 25.1.11	
		Porvattensammansättning 24.1.12	Porvattensammansättning 25.1.12	
		Föreningshalter 24.1.13	Föreningshalter 25.1.13	
Kod:	Stora insatser	Måttliga insatser		
		Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod		

Bränsleupplösningen har härigenom blivit ännu viktigare för säkerheten. Scenariot med en skadad buffert innebär högre vattenflöden. Detta är en något annorlunda situation än den som hittills legat till grund för planeringen av experiment och utvärderingar. Forskningsprogrammet är inriktat på att belysa sådana förhållanden, till exempel genom försök i närvaro av korroderande järn eller med sådana reducerande ämnen som finns i djupa grundvatten.

En annan viktig omständighet är den ökande utbränningen av bränslet samt den planerade användningen av Mox-bränsle i svenska reaktorer. Experimentella och teoretiska utvärderingar måste naturligtvis följa med i den utvecklingen. Den ökande betydelsen av bränsleupplösning understryker dessutom behovet av att belysa vilken inverkan högre utbränning och användning av andra bränsletyper får. Avsnitt 22.2.12 presenterar nya resultat och inriktningen av det nya programmet för bränsleupplösning. Behovet av ytterligare teoretiska utvärderingar beskrivs till exempel i avsnitt 22.2.15, som handlar om uppbyggnad av helium från alfapartiklar.

På mycket lång sikt är radium, som genereras av uran via kedjesönderfall, av betydelse för säkerheten. Ett intressant förhållande är att mängden barium är flera storleksordningar större än mängden radium. Fenomenet samfällning av radium med barium skulle kunna minska frigörelsen av radium. Detta behandlas i avsnitt 22.1.8 och 22.2.14.

19.2.3 Kapseln som barriär

Med en intakt kapsel är det använda bränslet helt isolerat. Alla processer som på något sätt skulle kunna påverka och skada kapseln är därför av särskilt intresse för säkerhetsanalysen. Hit hör till exempel mekaniska belastningar under en glaciation och vid ett jordskalv samt de typer av korrosion som skulle kunna förekomma, se avsnitt 23.2.1.

Kapselns förmåga att stå emot en deformation på grund av yttre belastning undersöks såväl experimentellt som teoretiskt. Gjutjärnsinsatsen är viktig för den mekaniska stabiliteten och hållfastheten hos såväl intakta som defekta insatser prövas, se avsnitt 23.2.4 och 23.2.5. Förmågan att stå emot skjuvrörelser prövas genom probabilistiska analyser. Vi undersöker dessutom möjligheterna att göra experiment med skjuvning i Sverige eller i samarbete med något annat land. Det finns också farhågor om att krypning i kopparmaterialet skulle kunna uppkomma som ett resultat av att kapseln belastas. Modeller som kan beskriva detta fenomen kommer att tas i bruk.

Undersökningarna av kapselkorrosion fortsätter. Detta beskrivs i avsnitt 23.2.12. En viktig del av detta är frågan om spänningsskorrosion. Förutsättningarna för spänningsskorrosion, under de geo-kemiska förhållanden som råder i undersökningsområdena, kommer att undersökas. Konsekvensen av främmande ämnen i svetsen kommer också att utredas ytterligare, se avsnitt 23.1.6.

19.2.4 Buffert

Efter deponeringen kan bufferten ta upp ytterligare vatten, svälla och utvecklas mot ett tillstånd av vattenmättnad och homogenitet. Detta påverkar värmeledningsförmågan och buffertens övriga egenskaper, vilka bidrar till att stabilisera deponeringshålet och skydda kapseln. Funktionsindikatorer med tillhörande kriterier används för att utvärdera buffertens funktion i säkerhetsanalysen. Dessa ger en god uppfattning om vad som förväntas, se tabell 24-1 i kapitel 24. Det är viktigt att kunna förutsäga vilket tillstånd bufferten till slut uppnår och ungefär hur lång tid detta tar. Förloppet studeras både i laboratorium, in situ och i olika skalor. Resultaten används för att pröva de modeller som används för att beskriva förloppet och för att förse modellerna med värden på ingående materialparametrar, se avsnitt 24.2.5.

I den vattenmättade bufferten är det flera processer som behöver studeras med tanke på buffertens betydelse för säkerheten och de långa tider som måste överblickas. Processer som alltjämt behöver studeras är bland annat frysning av bentonit, se avsnitt 24.2.4, och gastransport, se avsnitt 24.2.7. Det senare ska prövas in situ och i full skala inom projektet Lasgit i Äspölaboratoriet. En process som fått ökad aktualitet i och med studierna av istidsscenarioet i SR-Can är kolloidfrigörelse och erosion, se avsnitt 24.2.18. Smältvatten från en inlandsis kan i sämsta fall dispergera bentoniten om relativt stora flöden av sådant vatten når bufferten. Ett särskilt projekt har startats för att så snart som möjligt utreda den frågan.

En av de pågående studierna av bufferten avser KBS-3H. Den successiva deponeringen av färdiga kapsel-buffertpaket med pluggar mellan paketen ger förhållanden där erosion skulle kunna uppstå, se avsnitt 24.2.8. Även svällningen är en viktig process för att stabilisera bufferten i KBS-3H. De färdiga paketen har en yttre behållare av perforerat stål. Bufferten ska svälla ut genom hålen och täta mot bergväggen i deponeringstunneln. Studier av svällning beskrivs allmänt i avsnitt 24.2.9. Både laboratoriestudier och modellutveckling ingår.

19.2.5 Återfyllning

Säkerhetsanalysen SR-Can analyserade två olika sammansättningar av återfyllningsmaterial. I båda fallen fylldes deponeringstunnlarna med förkompakterade block. I det ena fallet valdes en naturligt svällande lera – Friedlandlera – som exempel, i det andra fallet valdes en blandning av bentonit och sand i proportionerna 30/70. Användningen av förkompakterade block motiverades av grundvattnets relativa salthalt. Salthalten ställer krav på hög halt av lera, vilket i sin tur leder till svårigheter att kompaktera återfyllningen på plats. Den från flera synpunkter bästa lösningen visade sig vara block av Friedlandlera /19-1/.

En viktig process i återfyllningen är svällning, se avsnitt 25.2.10. Den ska motverka buffertens uppsvällning, trycka mot berget så att inga spalter uppstår, förhindra eventuella utfall av bergblock från taket, motverka så kallad spalling som kan bilda sprickor nära bergväggen, svälla och komprimera fyllningen av pelletar i spalten mellan berg och återfyllningsblock – om det blir den återfyllningstekniken som väljs – samt läka eventuella kanaler som uppstår efter kanalbildning, erosion och den efterföljande mekaniska utvecklingen. Processer som kan påverka svällningen blir därigenom också viktiga, till exempel fryssing, se avsnitt 25.2.5, och erosion, se avsnitt 25.2.9.

19.2.6 Geosfär

Ett jordskalv kan ge upphov till skjuvrörelser i bergets sprickor. Storleken på förskjutningen beror på sprickornas utsträckning och avstånd från skalvet. Betydelsen av detta prövas i säkerhetsanalysen. Modeller för att beräkna berg rörelser och metoder för att bestämma sprickornas egenskaper i ett förvar är forskningsområden som beskrivs i avsnitt 26.2.5, 26.2.7 och 26.2.8.

Det använda bränslet alstrar värme som tas upp av berget i förvaret. Förändringar som kan orsakas av uppvärmning studeras i Äspölaboratoriet. Detta är nödvändigt för säkerhetsanalysen. Om det uppstår sprickor i deponeringshålens väggar på grund av uppvärmning och för höga bergspänningar kan transportmotståndet i närområdet försämrats. Forskningen inom det här området beskrivs i avsnitt 26.2.6.

Grundvattenströmningen på de undersökta platserna simuleras med numeriska modeller, vilka fort-löpande utvecklas och förbättras. Grundvattenflödet är av central betydelse för säkerhetsanalysen. Inte enbart dagens förhållanden ska beskrivas utan också framtida hydrogeologiska förhållanden, till exempel de som råder under en istid. Utvecklingen av modeller för grundvattenströmning beskrivs i avsnitt 26.2.3. Förhållanden som råder under återmättnad av förvaret behandlas också, men på ett mer förenklat sätt. Detta beskrivs i avsnitt 26.2.4.

Säkerhetsanalysen prövar alltid betydelsen av att isoleringen bryts och att grundvattnet kommer i kontakt med det använda bränslet. I ett sådant fall finns olika transportmotstånd som begränsar spridningen av radionuklider. För att kunna beräkna transportmotståndet i berget undersöks processerna advektion/blandning (se avsnitt 26.2.12), och kolloidomsättning (se avsnitten 26.2.20 och 26.2.21). Modellkoder som behövs för att beräkna transport av upplösta ämnen, såväl radionuklider som andra ämnen av betydelse för säkerheten, utvecklas ständigt. En ny sådan beräkningskod är Marfa. Marfa klarar även transportberäkningar i övergången mellan olika flödessituationer som kan uppstå till följd av stora förändringar i klimatet, till exempel i samband med en istid.

De geokemiska undersökningarna på platsen måste alltid kompletteras med studier av kemiska förändringar till följd av att främmande ämnen tillförts den naturliga miljön i berget, se avsnitt 26.2.19, och på grund av eventuella framtida stora klimatiförändringar, se avsnitten 26.2.15 och 26.2.16. Platsundersökningarna kompletteras dessutom med undersökningar av mikrobiella processer, se avsnitt 26.2.18, och gaser lösta i grundvattnet, se avsnitt 26.2.22.

19.2.7 Biosfär

I säkerhetsanalysen SR-Can har platsdata och modeller som beskriver ekosystemen använts i större utsträckning än tidigare för att beräkna vilka konsekvenser radionuklider i biosfären får. Utvecklingen av förståelsen för de ingående processerna och beskrivande biosfärmodellerna behandlas i avsnitt 27.2.

För att beräkna hur radionuklider sprids i biosfären behövs beräkningsmodeller som tar hänsyn till landskapets förändring i tid och rum. Att numera även konsekvenserna för flora och fauna tas med innebär att modellerna måste behandla flödet av radionuklider i hela ekosystemet. Utvecklingen och användningen av landskapsmodellen behandlas i avsnitt 27.3.

Flödet av vatten i biosfären och i övergången mellan geosfär och biosfär avgör tillsammans med övriga transportprocesser vilka ekosystem och organismer som kommer att utsättas för radionuklider. Transportprocesser behandlas i avsnitt 27.4. Definitioner och beskrivningar av de viktigaste processerna i olika typer av ekosystem, såsom det terrestra och akvatiska, tas upp i avsnitt 27.5 och 27.6. Interaktionen mellan olika ekosystem är också av intresse för fortsatta studier. Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt kan inverka på biosfären och sådana studier beskrivs i avsnitt 27.7.

Biosfärsprogrammet, som genomförts inför SR-Can och fortsättningen inriktad på SR-Site, är det mest ambitiösa hittills för SKB. Forskningsinsatserna strävar mot att uppnå en tillräcklig förståelse för processer och fenomen, för att sedan kunna åstadkomma de numeriska modeller som behövs för dosberäkningar, se avsnitt 27.9. Platsundersökningarna gör konceptuella beskrivningar möjliga och förser beräkningsmodellerna med indata. Forskningen inom biosfärsområdet har även till uppgift att ge vägledning för hur insamlingen av platsdata ska gå till, se avsnitt 27.10.

19.2.8 Forskning i Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet är SKB:s anläggning för att utveckla, pröva och demonstrera teknik för att deponera använt kärnbränsle. Flera av projekten som genomförs där har även till syfte att ge kunskap om långsiktig säkerhet. Ett stort antal projekt är helt inriktade på sådana experiment. De flesta av de här experimenten avser bufferten och berget i deras funktion att skydda kapseln och tjäna som barriärer mot spridning av radionuklider. Det förekommer även experiment som rör kapselns funktion och försök inriktade på bränslet. I tabell 19-3 ges ett antal exempel på projekt i Äspölaboratoriet som är helt eller delvis inriktade på långsiktig säkerhet. Tabellen hänvisar till avsnitt i följande kapitel där läsaren kan orientera sig i försökens betydelse för att förstå och modellera olika processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten. Ibland är det teknikutveckling som är det främsta syftet i ett projekt och ibland kan gränserna mellan teknikutveckling och forskning vara flytande. Den långsiktiga säkerheten är naturligtvis utgångspunkten för all utveckling av slutförvarsteknik. Om vi prövar ny teknik måste vi samtidigt pröva huruvida den uppfyller säkerhetsanalysens krav.

Det internationella deltagandet i verksamheten vid Äspölaboratoriet är av stor betydelse. En bred medverkan från många forskare i olika länder och organisationer innebär att gängse teorier och uppnådda resultat utsätts för en både omfattande och ingående prövning. Härvidlag har expertgrupperna varit till god hjälp. De sätts samman för speciella ändamål för att utveckla experimenten och tolka resultaten. Ett exempel på en sådan grupp är Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes, se avsnitt 26.2.26.

Högskolan i Kalmars forskarskola är numera ett inslag i Äspölaboratoriet. Forskarskolans verksamhet omfattar även studier i de områden i närheten där SKB bedriver platsundersökningar. Forskarskolans studier av transport och spridningsmekanismer av miljöstörande ämnen i berg, jordlager och biosfär är allmänt inriktade, men naturligtvis även av betydelse för SKB. Förhoppningsvis kan utbildningen på forskarskolan också hjälpa till att utveckla kompetens för våra framtida behov.

Tabell 19-3. Exempel på projekt och experiment i Äspölaboratoriet, vilka helt eller delvis är inriktade på forskning om långsiktig säkerhet.

Projekt-experiment	Avsnitt
Experiment i Chemlabsonderna	22.2.12, 26.2.17
Minican-försöken	23.2.7, 23.2.16
Prototypförvaret	24.2.5, 24.2.11, 24.2.12, 25.2.6, 25.2.7, 26.2.2, 26.2.6, 26.2.18
Lasgit-försöket	24.2.7, 24.2.8
TBT-försöket	24.2.3, 24.2.5, 24.2.11
Återtagningsförsöket	24.2.5, 24.2.6, 24.2.11, 24.2.21, 26.2.2
Lot-försöken	23.2.12, 24.1.2, 24.2.6, 24.2.9, 24.2.14, 24.2.15, 24.2.16, 24.2.17, 24.2.21
Alternativa buffertmaterial	24.1.2, 24.2.6, 24.2.9, 24.2.16
Kolloidprojektet (Colloid)	26.2.21
Återfyllning och pluggning	25.2.2, 25.2.7
Apse-försöket (Pelarförsöket)	26.2.5, 26.2.6, 26.2.8
True-försöken	26.2.26
LTDE-försöken	26.2.14, 26.2.17
Matrisförsöket	26.2.15
Mikrobprojektet	26.2.18, 26.2.22
Micomig-projektet	26.2.17

Hänvisningarna avser avsnitt i kommande kapitel där motsvarande process behandlas, det vill säga kapitel 22 Bränsle, 23 Kapsel, 24 Buffert, 25 Återfyllning och 26 Geosfären.

19.3 Andra metoder

SKB:s forskning och utveckling är inriktad på deponering av använt bränsle enligt KBS-3-metoden, men en del studier görs också av andra metoder såsom separation och transmutation samt djupa borrhål. Programmen beskrivs närmare i kapitel 28. Följande avsnitt ger endast en kort överblick.

19.3.1 Separation och transmutation

Sedan 16 år tillbaka stöder SKB utvecklingen av kunskap inom området separation och transmutation. Om tekniken en dag blir verklighet skulle det vara ett sätt att minska innehållet av långlivade radioaktiva radionuklider i avfallet och på köpet även utvinna mer energi. Att utveckla metoder och anläggningar för separation och transmutation kräver emellertid stora resurser. Sverige kan inte ensamt driva en sådan utveckling, utan det skulle kräva ett internationellt samarbete eller att någon stormakt engagerar sig. Än så länge befinner sig forskningen på en grundläggande nivå, även internationellt. SKB:s inriktning är främst att följa med i den utvecklingen. SKB stöder forskning om separation och transmutation vid Kungliga Tekniska Högskolan, Uppsala universitet och Chalmers Tekniska Högskola. Forskarna där är i sin tur engagerade i ett flertal EU-projekt och kan på så vis delta i den internationella forskningen inom området. Storleken på det stöd SKB ger till forskningen i Sverige är så vald att den ska ge en tillräcklig bredd och en tillräcklig omfattning för att vara livskraftig. För att delta i den internationella utvecklingen måste man bidra med kompetenta samarbetspartner och ha institutioner inom landet, där forskning inom området bedrivs på en acceptabel nivå.

Under 1990-talet fästes stora förhoppningar om att med en protonaccelerator alstra neutroner som driver en underkritisk reaktor, vilken i sin tur alstrar de snabba neutroner som behövs för att omvandla – transmutera – de separerade långlivade nukliderna. Intresset för detta tycks ha minskat i och med utvecklingen av den så kallade fjärde generationens reaktorer. Där ingår snabba reaktorer som också kan åstadkomma transmutation. När det gäller separation är det framför allt våta metoder som SKB bevakar. Där sker det mesta av den internationella utvecklingen. En redovisning av SKB:s forskningsprogram inom området separation och transmutation finns i avsnitt 28.1.

19.3.2 Djupa borrhål

Möjligheten av att deponera använt bränsle i djupa borrhål utreddes av SKB redan i början av 1990-talet. Ytterligare utredningar har gjorts sedan dess utan att man egentligen funnit något som talar för att förvar i djupa borrhål skulle öka säkerheten för att slutförvara det använda bränslet. Djupare förvaring innebär att man i högre grad utnyttjar det skydd som berget ger mot spridning av radionuklider. Samtidigt ökar påfrestningarna på de tillverkade barriärerna, kapsel och buffert. På flera kilometers djup blir konsekvensen att den långsiktiga säkerheten i huvudsak vilar på att djupt salt grundvatten tenderar att ligga kvar genom sin högre täthet. I KBS-3-metoden svarar främst de tillverkade barriärerna för säkerheten. Dessa är lättare att kontrollera än förhållandena i berget på flera kilometers djup. Även deponeringen är betydligt lättare att kontrollera i ett KBS-3-förvar än i djupa borrhål. KBS-3-metoden framstår med andra ord som den bättre lösningen. SKB fortsätter dock att bevaka utvecklingen av såväl kunskapen om berget som tekniken för att borra och deponera på flera kilometers djup. Läs mer om detta i avsnitt 28.2.

20 Säkerhetsanalys

Under platsundersökningsskedet genomför SKB två säkerhetsanalyser av KBS-3-förvar:

- Analysen SR-Can, där platsdata hämtas från preliminära resultat av platsundersökningarna i Oskarshamn och Forsmark.
- Analysen SR-Site, där data från de fullbordade platsundersökningarna används.

SR-Can utgör inte underlag för någon ansökan, medan SR-Site enligt planerna ska ingå i ansökan för slutförvaret. SR-Can redovisades i november 2006 /20-1/ och granskas för närvarande av SKI, SSI och deras internationella experter. En förenklad svensk sammanfattning av SR-Can-rapporten publicerades i maj 2007 /20-2/.

Metodutvecklingen för säkerhetsanalysen sker inom dessa två säkerhetsanalysprojekt. Redovisningen av utvecklingen görs huvudsakligen i form av tillämpningar i säkerhetsredovisningarna. Således redovisades en betydande utveckling av metoden för säkerhetsanalys i SR-Can-rapporten i november 2006. All återstående utveckling under perioden syftar till att metoderna ska tillämpas i säkerhetsanalysen SR-Site.

I det följande redovisas planer för dels metodikutveckling, dels utveckling av verktyg för integrerad modellering. Planerna rör metodik för säkerhetsanalyser för ett slutförvar för använt kärnbränsle, men den resulterande metodiken bör i stora delar vara användbar även för andra geologiska förvar för radioaktivt avfall. Kunskapsuppbyggnad kring enskilda processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten redovisas i kapitlen 22 till 26. Dessa redovisningar är i stort strukturerade enligt säkerhetsanalysens processrapporter. Förståelsen för framtida klimatutveckling beskrivs i kapitel 21 och för spridningen och effekterna av de radioaktiva ämnena i miljön i kapitel 27.

20.1 Metodik för att analysera förvarets långsiktiga säkerhet

20.1.1 Metodik i SR-Can

Översikt

En metodik i tio steg har utvecklats för SR-Can för att analysera förvarets långsiktiga säkerhet. Den sammanfattas i figur 20-1. Dessa steg utförs delvis parallellt, delvis sekvensiellt. De tio stegen beskrivs närmare nedan.

1. Identifiering av faktorer att beakta (Fep-hantering)

Detta steg består av att identifiera alla faktorer som ska ingå i analysen. Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser används, tillsammans med KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer (features, events, processes – Fep) som påverkar den långsiktiga säkerheten. En Fep-databas har utvecklats för SR-Can. I denna klassificeras de allra flesta företeelser som är relaterade till initialtillståndet, till interna processer eller till externa faktorer. Återstående egenskaper, händelser och processer är antingen relaterade till analysmetodiken i allmänhet, eller bedömda som irrelevanta för KBS-3-metoden. Utgående från resultaten av Fep-hanteringens har en Fep-katalog för SR-Can upprättats, med Fep som ska behandlas i SR-Can. Detta steg i Fep-hanteringens beskrivs ytterligare i /20-1, kapitel 3/ och dokumenteras fullständigt i Fep-rapporten i SR-Can.

2. Beskrivning av initialtillståndet

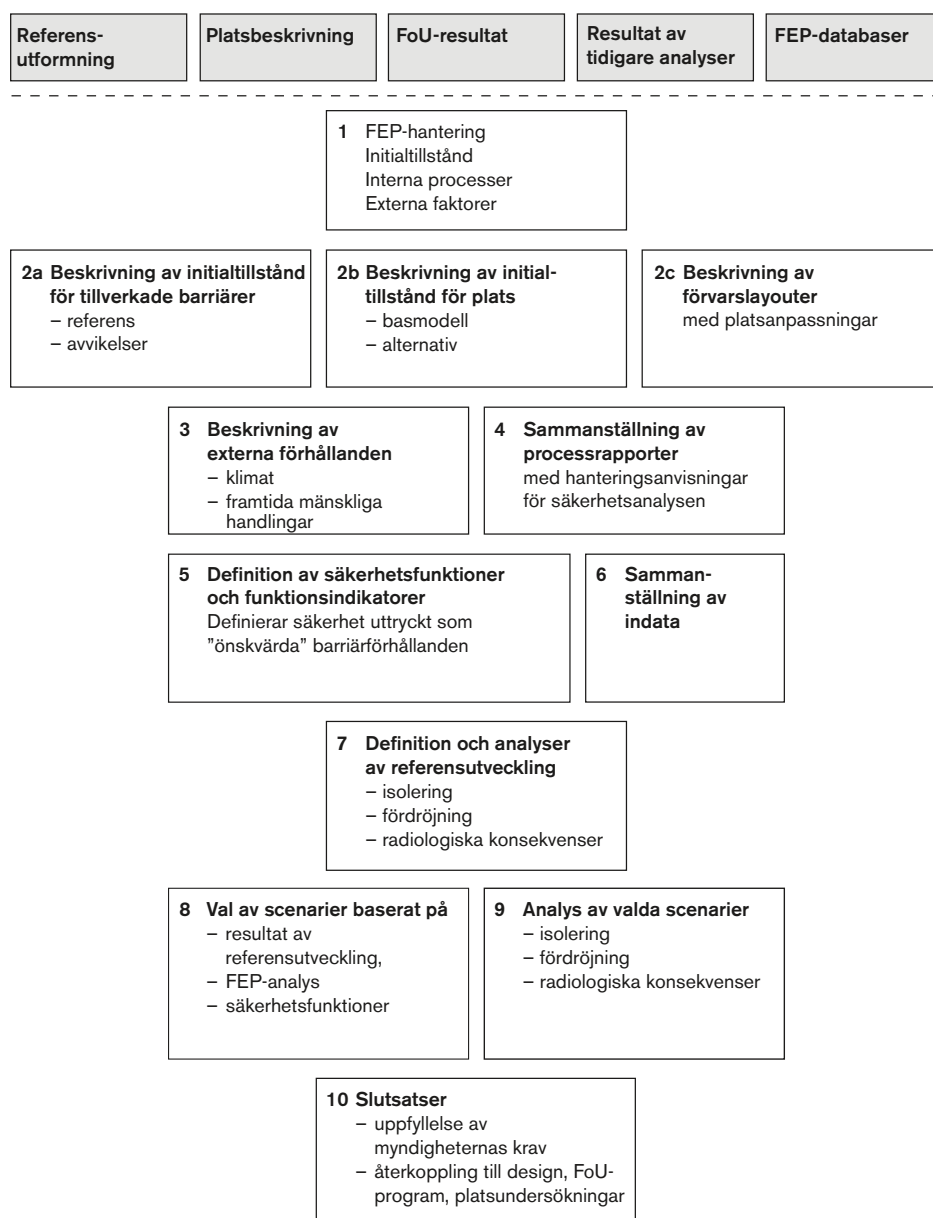
Systemets initialtillstånd beskrivs utgående från specifikationerna för KBS-3-förvaret, en beskrivande modell av platsen för slutförvaret och en platsspecifik layout av förvaret. Initialtillståndet för bränslet och de tillverkade komponenterna avser förhållandena omedelbart efter deponering, såsom beskrivs i en särskild Initialtillståndsrapport. Initialtillståndet för geosfären och biosfären avser de naturliga förhållandena innan brytningsarbetet inleds, enligt de platsbeskrivande modellerna för platserna Forsmark /20-3/ och Laxemar /20-4/. Förvarslayouter, anpassade till platserna, ges i /20-5/ och /20-6/ för Forsmark respektive Laxemar, se vidare i /20-1, kapitel 4/.

3. Beskrivning av externa förhållanden

Faktorer relaterade till externa förhållanden delas in i de tre kategorierna ”klimatrelaterade frågor”, ”storskaliga geologiska processer och effekter” samt ”framtida mänskliga handlingar”. Hanteringen av dessa faktorer beskrivs i Klimatrapporten, Geosfärprocessrapporten, respektive FHA-rapporten. Se vidare i /20-1, kapitel 5/.

4. Beskrivning av processer

Identifieringen av relevanta processer bygger på tidigare analyser och Fep-hantering. Alla identifierade processer inom systemgränsen, som är relevanta för den långsiktiga utvecklingen av systemet, beskrivs i särskilda processrapporter. För varje process dokumenteras dess generella egenskaper, under vilken tidsperiod den har betydelse, vilka andra processer den är kopplad till och hur processen ska hanteras i säkerhetsanalysen, se vidare i /20-1, kapitel 6/.



Figur 20-1. Översikt av de tio huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Can. Rutorna ovanför den streckade linjen visar indata till analysen.

5. Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Detta steg består av en redogörelse för systemets säkerhetsfunktioner och av hur dessa kan utvärderas med hjälp av en uppsättning säkerhetsfunktionsindikatorer som i princip utgörs av mätbara eller beräkningsbara egenskaper hos systemet. Kriterier ges för säkerhetsfunktionsindikatorerna. Processrapporterna är viktiga referensdokument för detta steg. Ett Fep-diagram tas fram som visar hur Fep förhåller sig till säkerhetsfunktionsindikatorer. Genomförande och resultat av detta steg beskrivs i /20-1, kapitel 7/.

6. Sammanställning av indata

En strukturerad procedur används för att välja data för att kvantifiera slutförvarets utveckling och för dosberäkningar. Urvalsprocessen och valda datavärden beskrivs i en särskild Datarapport. En flexibel mall för att diskutera osäkerheter i indata har utvecklats och tillämpats, se vidare i /20-1, kapitel 8/.

7. Definition och analys av referensutveckling

En referensutveckling, som beskriver en tänkbar utveckling av förvarssystemet, definieras och analyseras. Systemets isoleringsförmåga över tiden analyseras i ett första steg. Denna analys beskriver den allmänna utvecklingen av systemet och en utvärdering av säkerhetsfunktionsindikatorerna görs. Om utvecklingen leder till att isoleringen bryts analyseras den fördröjande potentialen hos slutförvaret och dess omgivning och doskonsekvenser beräknas för de långsiktiga förhållandena som identifieras i det första steget. Vissa typer av kapselbrott som inte inträffar i referensutvecklingen analyseras för att ytterligare klargöra systemets fördröjningsegenskaper. Varje process hanteras i enlighet med de planer som beskrivs i processrapporterna. Se vidare i /20-1, kapitel 9/ för en analys av den allmänna utvecklingen och isoleringsförmågan, samt i /20-1, kapitel 10/ för en analys av fördröjningsförmågan.

8. Val av scenarier

En uppsättning scenarier väljs för analys. Ett omfattande huvudscenario definieras i enlighet med SKI:s föreskrifter SKIFS 2002:1. Huvudscenariot liknar referensutvecklingen som analyserades i steg 7. Valet av ytterligare scenarier bygger på säkerhetsfunktionerna i förvaret. Säkerhetsfunktionsindikatorerna som definierades i steg 5 är en viktig utgångspunkt för valet. För varje säkerhetsfunktion analyseras om det rimligen skulle kunna uppstå en situation där funktionen inte upprätthålls. Om så är fallet får motsvarande scenario ingå i riskvärderingen för slutförvaret. Den totala risken fastställs genom summering över sådana scenarier. I uppsättningen valda scenarier ingår även till exempel scenarier som nämns explicit i tillämpliga föreskrifter, som mänskligt intrång, liksom scenarier och varianter som har till syfte att undersöka konstruktionsmässiga frågor och olika komponenters roller i förvaret. Se vidare i /20-1, kapitel 11/ för en beskrivning av metodiken för scenarieval och tillämpning av urvalsmetoden.

9. Analys av valda scenarier

Huvudscenariot analyseras i första hand genom hänvisning till referensutvecklingen i steg 7. Ett viktigt resultat är ett beräknat riskbidrag från huvudscenariot. Ytterligare scenarier analyseras genom att fokusera på faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte upprätthålls. I de flesta fall sker dessa analyser genom en jämförelse med utvecklingen för huvudscenariot. Analyserna innefattar alltså endast de aspekter på förvarets utveckling där scenariot i fråga avviker från huvudscenariot. För dessa scenarier, liksom för huvudscenariot, uppskattas ett riskbidrag, se vidare i /20-1, kapitel 12/.

10. Slutsatser

Detta steg omfattar sammanställning av resultat från de olika scenarioanalyserna, slutsatser med avseende på säkerhet i relation till myndighetskriterier och återkoppling med avseende på förvarsutformning, fortsatta platsundersökningar och SKB:s Fud-program. Se vidare i /20-1, kapitel 13/.

I de följande avsnitten tas några viktiga aspekter av metodiken upp mer i detalj.

Säkerhetsfunktioner

De viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna för KBS-3-förvaret kan sammanfattas i säkerhetsfunktionerna isolering och fördröjning. För en detaljerad och kvantitativ förståelse och utvärdering av förvarets säkerhet krävs en mer detaljerad beskrivning av hur de huvudsakliga säkerhetsfunktionerna isolering och fördröjning upprätthålls av komponenterna i förvaret. Utgående från förståelsen av komponenternas egenskaper och den långsiktiga utvecklingen av systemet, identifierades i SR-Can ett antal säkerhetsfunktioner som är underordnade isolering och fördröjning. Dessa spelar en central roll i metodiken för analysen genom att de:

- bidrar till att i ett tidigt skede fokusera analysen på de frågor som är av avgörande betydelse för säkerheten,
- ger struktur för redovisningen av förvarets referensutveckling, som i sin tur utgör grunden för ett huvudscenario i säkerhetsanalysen,
- utgör en viktig grund för val av ytterligare scenarier.

Följande definitioner används:

- En säkerhetsfunktion är den roll som en förvarskomponent har för att bidra till säkerheten.
- En säkerhetsfunktionsindikator är en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos en komponent i ett förvar. Den anger i vilken utsträckning en säkerhetsfunktion är uppfylld.
- Ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator är en kvantitativ gräns. Om funktionsindikatorn uppfyller kriteriet är motsvarande säkerhetsfunktion uppfylld.

Figur 20-2 ger en översikt över säkerhetsfunktioner, deras indikatorer och kriterier.

Säkerhetsfunktioner bidrar till säkerhetsbedömningen, men uppfyllelse av alla kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är varken nödvändigt eller tillräckligt för att fastställa att förvaret är säkert. De olika kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer anges dessutom med olika acceptansmarginaler.

Säkerhetsfunktionerna är relaterade till, men inte identiska med konstruktionskriterierna. Medan konstruktionskriterier hänför sig till förvarets initialtillstånd – och i första hand till dess tillverkade komponenter – ska säkerhetsfunktionerna vara uppfyllda under hela analysperioden och hänföra sig till såväl tillverkade komponenter som det naturliga systemet.

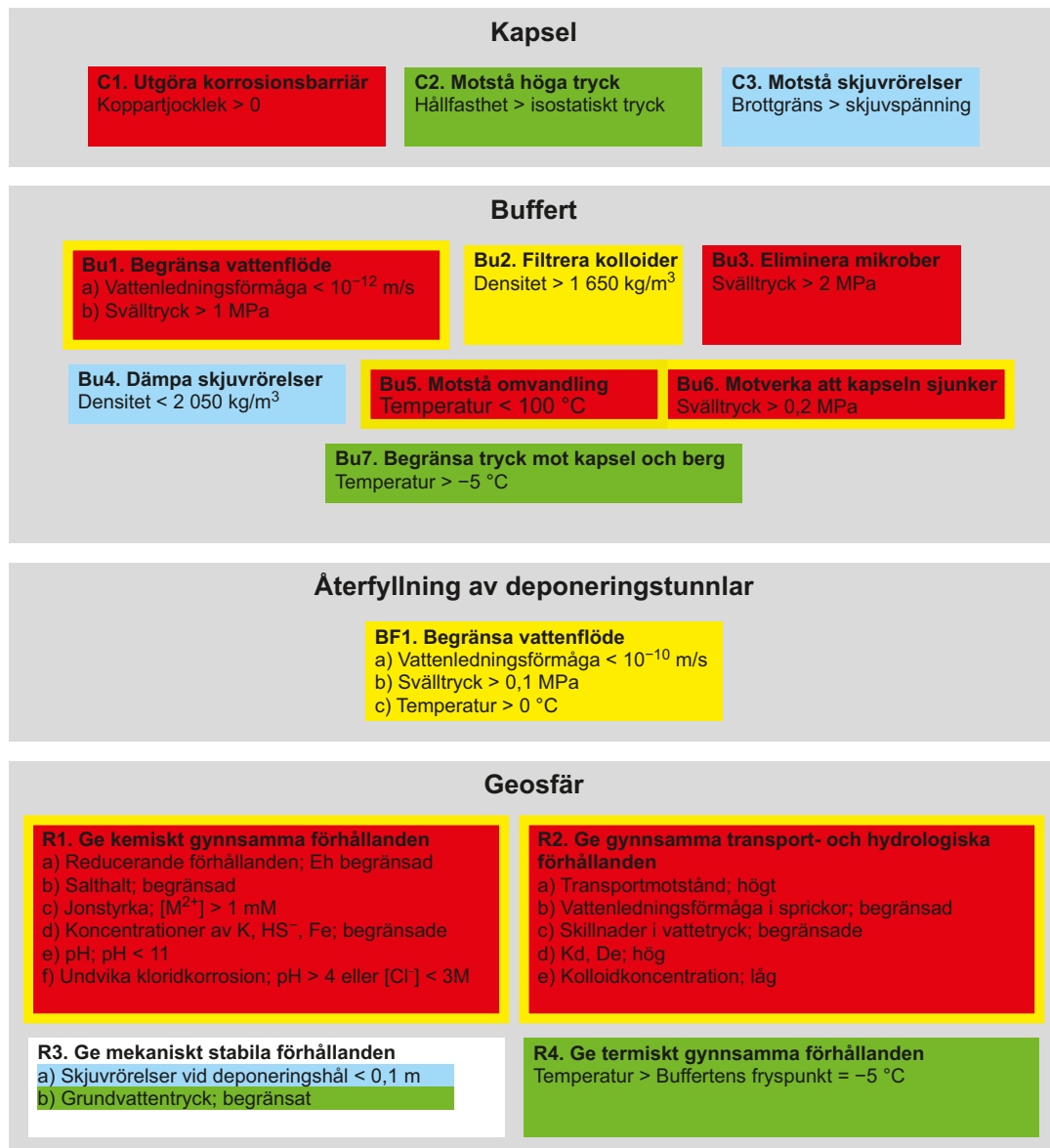
Metod för scenarieval

Analysen av förvarets säkerhet bryts ner i ett antal scenarier. Ett omfattande huvudscenario representerar en rimlig utveckling av förvarssystemet. Utvecklingen av detta scenario är nära kopplat till referensutvecklingen, se steg 7 i överblicken av metodiken ovan. En uppsättning ytterligare scenarier definieras för att täcka osäkerheter som inte beaktas i referensutvecklingen, till exempel mer extrema klimatförhållanden än de som studeras i referensutvecklingen.

Säkerhetsfunktionerna används för att få en omfattande uppsättning scenarier. Fokus ligger på viktiga frågor för förvarssäkerheten. När man definierar ett scenario postuleras att en säkerhetsfunktion bryts, varefter alla tänkbara vägar till ett sådant brott utreds. Målet är att svara på frågan: Finns det någon rimlig möjlighet att detta scenario skulle kunna inträffa? Om så visar sig vara fallet tas konsekvenserna av scenariot i fråga med i en risksummering för förvaret. I annat fall betraktas scenariot som ett ”restscenario” och konsekvenserna kan analyseras som en illustration.

Ett scenario med kapselbrott på grund av isostatiskt övertryck får exemplifiera angreppssättet. I detta scenario beaktas missöden vid tillverkningen av de lastbärande kapselinsatserna, svälltryck som överstiger referensvärdena för bufferten och mycket kraftiga istäcken som ger högre grundvattentryck.

Förutom scenarierna som tas fram på detta sätt söks scenarier som krävs av myndighetsföreskrifter eller som av andra skäl bedöms som relevanta. Tabell 20-1 ger en översikt över de scenarier som valdes i SR-Can.



Figur 20-2. Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer. Om kvantitativa kriterier inte kan ges används i stället termer som "hög", "låg" och "begränsad" för att ange gynnsamma värden för funktionsindikatorerna. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner C1 (röd), C2 (grön), C3 (blå) eller till fördröjning (gul). Många funktioner bidrar till både C1 och fördröjning (röd ruta med gul kant).

Kvalitetssäkring

Inom ramen för arbetet med SR-Can har en kvalitetsplan för säkerhetsanalysen utvecklats. Där beskrivs samlat bland annat en rad styrande dokument som anger hur olika moment inom projektet ska utföras. Flera av dessa rutiner, till exempel instruktioner för att skriva processrapporter och datarapport, bygger på rutiner som använts i tidigare säkerhetsanalyser. En nyhet i SR-Can är en "Model Summary Report" /20-7/ som kort beskriver de beräkningsmodeller som används i säkerhetsanalysen. Rapporten motiverar även valet av modell samt refererar till andra dokument där olika kvalitetssäkringsaspekter av modellerna beskrivs. Kopplingar mellan modellerna beskrivs i två så kallade Assessment Model Flow Charts, AMF. En annan nyhet är en databas över de experter som bidragit till säkerhetsanalysen. För varje expert anges bland annat utbildning, vetenskapliga meriter, erfarenheter av relevans för säkerhetsanalysen och projektgruppens motiv till val av just den experten.

Tabell 20-1. Resultat av scenariet i SR-Can. Gröna rutor anger förhållanden för basvarianten av huvudscenariot, röda anger avvikelser från dessa förhållanden. EBS (Engineered Barrier System) betecknar de tillverkade förvarsdelen, det vill säga kapseln, bufferten och depone-ringstunneln.

Huvudscenario				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Basvariant	Referens ± toleranser	Platsbeskrivande modell v. 1.2 (med varianter/osäkerheter)	Enligt processrapporter	Referensklimat (upprepningar av Weichselistiden). Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Växthusvarianten	Referens ± toleranser	Platsbeskrivande modell v. 1.2 (med varianter/osäkerheter)	Enligt processrapporter	Förlängd tempererad period. Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Ytterligare scenarier baserade på potentiell förlust av säkerhetsfunktioner ("mindre sannolika" eller "restscenarier" beroende på analysresultatet)				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Advektion i bufferten	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, inre processer och externa förhållanden som skulle kunna leda till förlust av den aktuella säkerhetsfunktionen. Analysen av huvudscenariot utgör utgångspunkt.			
Buffertfrysning	Se ovan			
Buffertomvandling	Se ovan			
	Beakta vart och ett av de tre bufferttillstånden ovan + intakt buffert, för analys av de tre kapselscenarierna nedan			
Kapselbrott på grund av isostatisk last	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, inre processer och externa förhållanden som skulle kunna leda till förlust av den aktuella säkerhetsfunktionen. Analysen av huvudscenariot utgör utgångspunkt.			
Kapselbrott på grund av skjuvrörelse	Se ovan			
Kapselbrott på grund av korrosion	Se ovan			
Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Intrång genom borring	Som basvarianten av huvudscenariot	Som basvarianten av huvudscenariot	Som basvarianten av huvudscenariot, utom processer som påverkas av borring	Referensklimat + borring
Ytterligare intrångsfall, till exempel närliggande brytningsplats	Som basvarianten av huvudscenariot	Som basvarianten av huvudscenariot	Som basvarianten av huvudscenariot, utom processer som påverkas av intrång	Referensklimat + intrång
Ej förslutet förvar (analyseras inte i SR-Can)	Som basvarianten av huvudscenariot, men ofullständig förslutning	Som basvarianten av huvudscenariot	Som basvarianten av huvudscenariot, modifierad beroende på initialtillstånd	Referensklimat

20.1.2 Program

Utvecklingsbehovet av metodiken för säkerhetsanalys redovisades nyligen i huvudrapporten SR-Can /20-1, avsnitt 13.9/. Diskussionen är upplagd efter de tio stegen som beskrevs i avsnitt 20.1.1 ovan. Inga skäl har framkommit för att ändra de bedömningar som gjordes i SR-Can-rapporten. Utvecklingsplanen kommer att stämmas av mot myndigheternas granskningsrapport för SR-Can då denna blir tillgänglig i december 2007. Generellt gäller också att vissa systemdelar som behandlades översiktligt i SR-Can (återfyllning av andra förvarsutrymmen än deponeringstunnlar, pluggar och tätning av undersökningsborrhål) kommer att hanteras mer ingående i SR-Site. Detta fordrar dock ingen metodutveckling. Kunskapsuppbyggnad kring dessa systemdelar redovisas i kapitel 25.

Följande utvecklingsbehov för säkerhetsanalysens olika moment redovisas i SR-Can:

1. Identifiering av faktorer att beakta (Fep-hantering)

SKB:s Fep-databas och Fep-katalogen, utvecklade för SR-Can, kommer att uppdateras inför SR-Site. Dessa produkter betraktas som mogna, vilket betyder att endast mindre modifieringar förutses. Den omfattande och tidskrävande kontrollen, som genomfördes inom SR-Can, mot NEA:s Fep-databas ledde till att ett fåtal nya faktorer måste beaktas. Det är inte meningsfullt att upprepa en sådan kontroll i SR-Site. Fep-rapporten kommer att uppdateras, baserat på erfarenheterna från SR-Can.

2. Beskrivning av initialtillståndet

Initialtillståndsrapporten, som beskriver bränslet och de tekniska barriärerna, kommer att uppdateras. Rapporten för SR-Site kommer även att innehålla en sammanfattning av de produktionssteg respektive barriär genomgått och hur detta kan ha påverkat säkerhetsanalysens initialtillstånd, det vill säga tillståndet omedelbart efter deponering.

Uppdaterade versioner av de platsbeskrivande modellerna kommer att användas till SR-Site. Hanteringen av den uppdaterade platsinformationen förutses likna hanteringen i SR-Can, det vill säga en kondenserad version med fokus på säkerhetsrelaterade aspekter i huvudrapporten och en kvalificering av väsentliga data till säkerhetsanalysen i Datarapporten.

Förvarslayouterna kommer att uppdateras till version D2, som används i SR-Site. Acceptanskriterier för deponeringshål som ska tillämpas i layout D2 kommer att utvecklas bland annat baserat på erfarenheterna i SR-Can.

3. Beskrivning av externa förhållanden

Hanteringen av externa förhållanden kommer att beskrivas i uppdaterade versioner av Klimat- och FHA-rapporterna. Vad gäller hanteringen av framtida mänskliga handlingar (FHA) förutses endast mindre, om några, förändringar.

4. Beskrivning av processer

Syftet med processrapporterna är att de ska utgöra en länk mellan vetenskapliga underlagsrapporter och säkerhetsanalysen genom att de kondenserar informationen i underlagsrapporterna med fokus på säkerhetsanalysens behov. Som sådana bedöms processrapporterna som betydelsefulla och de kommer därför att uppdateras till SR-Site, med huvudsakligen samma format som till SR-Can.

En uppdatering förutses till exempel vad gäller förståelsen för kolloidfrigörelse och erosion av bufferten då den exponeras för utspädd grundvatten. Denna uppdatering baserar sig på pågående experiment och andra källor. Det mesta av materialet i processrapporterna ses emellertid som tillräckligt moget för att återanvändas i SR-Site.

Behovet av processrapporter för de tillkommande systemdelarna bottenplatta i deponeringshål, pluggar, borrhålstätningar och återfyllning i övriga förvarsdelar, och som inte hanterades i SR-Can, se /20-1, avsnitt 6.1.1/, kommer att bedömas i planeringen av SR-Site.

Processtabellerna och "assessment model flow charts" (AMF:s), som introducerades i /20-1, kapitel 6/, ses som användbara instrument för att kondensera information och för att ge överblick. Dessa kommer att uppdateras till SR-Site.

5. Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Detta moment av analysen utgör en viktig grund för metodiken i SR-Can och planeras få en liknande roll i SR-Site. Uppsättningen säkerhetsfunktioner, indikatorer och kriterier kan komma att revideras baserat på nytillkommen kunskap i SR-Site.

Fep-kartan (Fep chart) som introducerades i /20-1, kapitel 7/ är ett användbart instrument för att ge överblick av "säkerhetslogiken" för KBS-3-förvaret. Det finns ett visst överlapp mellan informationen i Fep-kartan och AMF:erna (se steg 4 ovan), eftersom informationen från modelleringen används då säkerheten utvärderas. Det skulle kunna vara möjligt att förena dessa två instrument till ett, men detta skulle förmodligen kräva en Fep-karta för varje tidsperiod i analysen. Detta kommer att övervägas vidare då SR-Site planeras.

6. Sammanställning av indata

Formatet för att presentera indata och för att diskutera osäkerheter i indata i Datarapporten betraktas som moget och kommer därför i hög grad att återanvändas i SR-Site. Uppsättningen indata kommer att revideras baserat på resultaten i SR-Can och på tillkommande information i SR-Site. Datarapporten kommer att uppdateras.

7. Definition och analys av referensutveckling

Formatet för att analysera referensutvecklingen i SR-Can omfattar fyra tidsperioder. För varje period analyseras utveckling av yttre förhållanden, biosfären och THMC-förhållanden i förvaret. Därefter följer – för varje tidssteg – en utvärdering av säkerhetsfunktionerna. Detta format ses som adekvat och kommer att återanvändas i SR-Site.

Formatet för att analysera förvarets fördröjande förmåga, uppdelat efter olika sätt på vilka kapseln kan tänkas skadas, ses också som adekvat. Här är metoden för att analysera radionuklidtransport och dos i biosfären ny och innehåller stora delar av den metodik som enligt planerna kommer att användas i SR-Site.

8. Val av scenarier

En metod för scenarieval baserad på säkerhetsfunktioner introducerades i SR-Can. En huvudsaklig fördel med metoden är att den tar hand om alla identifierade frågor av säkerhetsmässig betydelse med ett begränsat antal scenarier. Detta uppnås genom att valet av scenarier fokuseras direkt på säkerhetsfunktionerna och inte på alla de osäkerheter som påverkar säkerheten. Dessa osäkerheter hanteras i stället systematiskt vid analysen av de valda scenarierna.

Metoden befanns också relativt rättfram att tillämpa och förklara, vilket är viktigt för transparensen hos säkerhetsanalysen. Samma metod kommer därför att användas i SR-Site.

9. Analys av valda scenarier

Metoden för att analysera valda scenarier ses som adekvat och i stort sett samma metod kommer därför att användas i SR-Site.

Uppskattningar av scenariosannolikheter till riskberäkningen gjordes ofta pessimistiskt. Bufferterosion antas till exempel alltid förekomma under glaciala förhållanden, eftersom detta inte kan uteslutas. Ett annat exempel utgör de tre möjliga hydrogeologiska tolkningar av Forsmark som gjordes i SR-Can. Den mest pessimistiska vad gäller konsekvenser – i termer av bufferterosion och kapselkorrosion – användes i risksummeringen i SR-Can, eftersom de platsbeskrivande modellerna som analysen baserades på inte medgav någon uppskattning av sannolikheter för de olika tolkningarna.

Detta angreppssätt motiveras primärt av kunskapsbrist. Väsentligen samma angreppssätt förutses för SR-Site för liknande situationer. Det ska dock också noteras att kunskapen kring ovanstående exempel kan ha utvecklats till SR-Site och därigenom möjliggör en mindre pessimistisk hantering.

10. Slutsatser

En väsentlig del av avslutningskapitlet i SR-Can består av en diskussion om uppfyllelse av myndigheternas krav på långsiktig säkerhet. Detta är SKB:s första redovisning av kravuppfyllelse enligt de relativt nytillkomna svenska föreskrifterna och visar SKB:s förståelse för hur kravuppfyllelse kan påvisas. Ett liknande format förutses för redovisningen i SR-Site.

20.2 Integrerad modellering

20.2.1 Systemutveckling

I Fud-program 2004 /20-8/ samt mer detaljerat i /20-9/ beskrivs en så kallad systemmodell. Den består av ett antal delmodeller, som var och en beskriver en del av den totala utvecklingen hos ett förvarssystem efter förslutning. Systemmodellen är avsedd som ett hjälpmedel i säkerhetsanalysen. I SR-Can användes bara den termiska delmodellen och den för kapselkorrosion, övriga områden modelleras med andra modeller.

Sedan redovisningen i Fud-program 2004 har en analytisk modell för beräkning av permafrostdjup tillkommit, se /20-1, appendix B/.

Den roll som förutses för systemmodellen i SR-Site är att med enkla beräkningar verifiera resultat från mer avancerade modeller och därigenom för det första kontrollera beräkningsresultat från komplexa modeller, samt för det andra påvisa vilka indata och processer som är viktigast för de delområden som modelleras och på så sätt demonstrera förståelse för de aktuella förloppen.

Områden som kan studeras på detta sätt inkluderar:

- Termisk utveckling i bränsle, kapsel, buffert och berg efter deponering och framåt för tempererat klimat.
- Permafrostdjup.
- Kemisk utveckling i buffert.
- Buffertens växelverkan med återfyllningen under svällning.
- Kapselkorrosion.
- Kapselns inre utveckling efter skada.

Endast mindre utvecklingsinsatser kring dessa modeller planeras för SR-Site.

20.2.2 Radionuklidtransport

För att beräkna radionuklidtransport i närområdet (kapseln, bufferten och tunnelåterfyllningen) och fjärrområdet (geosfären) finns sedan tidigare såväl numeriska, mer detaljerade modeller som analytiska, förenklade modeller /20-8/. Inom ramen för SR-Can utvecklades dessutom en analytisk modell som hanterar radionuklidtransport vid advektiva förhållanden i ett deponeringshål, se /20-1, appendix B/. Samtliga dessa modeller användes i SR-Can. Resultat från de analytiska jämfördes med resultat från numeriska modeller i ett antal fall med god överensstämmelse. Därefter användes de snabbare analytiska modellerna till att beräkna ett ytterligare stort antal fall där de var tillämpliga, medan vissa fall bara kunde beräknas med de numeriska modellerna, se vidare /20-1, kapitel 10/. Ett liknande angreppssätt kommer sannolikt att användas i SR-Site.

Den analytiska modellen för advektiva förhållanden behöver utvecklas för att inkludera även löslighetsgränser. I övrigt förutses inga utvecklingsbehov vad gäller de analytiska modellerna. Däremot behöver de fullt ut kvalitetssäkras till en liknande nivå som övriga modeller i säkerhetsanalysen. Detta kommer att göras inom ramen för SR-Site.

Ytterligare utveckling av de numeriska modellerna för närområdet och fjärrområdet beskrivs i avsnitten 25.3 respektive 26.2.26. Modellering av radionuklidtransport i biosfären beskrivs i kapitel 27.

21 Klimatutveckling

Jordens klimat varierar naturligt under tidsperioder från några få decennier upp till mer än 100 000 år. Klimatvariationerna beror till exempel på förändringar i solinstrålning orsakade av förändringar i jordens bana runt solen, vulkanutbrott och variationer i solaktivitet. Klimatförändringar under senare tid har även en antropogen komponent, som består av en ökning av mängden växthusgaser och aerosoler i atmosfären.

I det tidsperspektiv som funktionen och säkerheten hos ett slutförvar för använt kärnbränsle studeras, det vill säga 100 000-tals år och längre, har det skandinaviska klimatet varierat mycket. Detta har bland annat resulterat i upprepade istider. De senaste cirka 700 000 åren har en utveckling med drygt 100 000 år långa perioder med ett successivt kallare klimat (glacialer) avbrutna av en snabb övergång till kortare perioder med ett varmt klimat (interglacialer) upprepats i ett cykliskt mönster. Kunskap om klimat och klimatvariationer är därför av stor vikt när SKB analyserar säkerheten för ett förvar för använt kärnbränsle.

Även om klimatet vid markytan inte inverkar på förvarets funktion så mycket, är det troligt att framtida klimatvariationer medför att andra klimatrelaterade processer vid ytan kommer att göra det. Det gäller till exempel tillväxten av inlandsisar och permafrost samt förändringarna av havsytans nivå. Dessa processer påverkar i sin tur grundvattenflöde, grundvattenkemi och spänningar i jordskorpan som också är av vikt för förvarets funktion. Förvaret utformas därför för att motstå bland annat den påverkan som de klimatrelaterade processerna kan medföra. Klimatet vid markytan påverkar dessutom biosfärens utveckling i området. Biosfären styr till stor del människans aktiviteter, vilka ska kunna fortgå i landskapet utan att människan påverkas av närheten till det förslutna geologiska förvaret.

21.1 Klimatscenarier i säkerhetsanalysen

Det är i dag inte möjligt att tillförlitligt förutsäga framtidens klimat i de långa tidsperspektiv som krävs vid säkerhetsanalyser av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Trots det går det att uppskatta möjliga storleksordningar av framtida klimatförändringar, framför allt baserat på kunskap om naturliga klimatvariationer i det förgångna. Det framtida klimatet kommer att manifesteras sig som summan av naturliga variationer, inklusive intern variabilitet, och antropogen påverkan. Vid skattningar av möjliga framtida klimatförändringar är det därför viktigt att även behandla fall där den antropogena påverkan är inkluderad.

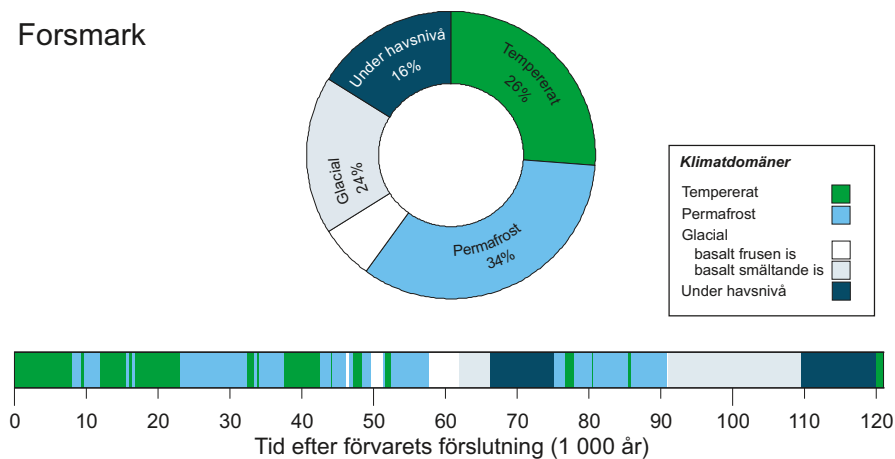
Baserat på dagens kunskaper är det med andra ord möjligt att beskriva inom vilka gränser det skandinaviska klimatet kan komma att variera, även i mycket långa tidsperspektiv. Inom dessa gränser kan vi identifiera vissa karakteristiska klimatrelaterade förhållanden som är av vikt för förvarets funktion. Dessa förhållanden kan beskrivas som klimatstyrda processtillstånd, nedan benämnda klimattillstånd, se figur 21-1. De tre identifierade klimattillstånden som har betydelse för förvaret och dess säkerhet är:

- Tempererat tillstånd
- Permafrosttillstånd
- Glacialt tillstånd

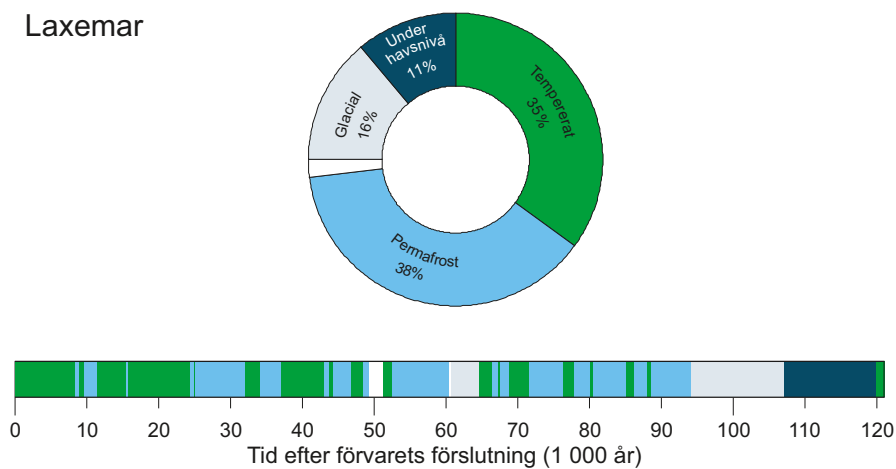
SKB fokuserar därför sina forskningsinsatser inom klimatområdet på att identifiera och förstå förhållanden och processer inom dessa klimattillstånd. Det är även viktigt att utreda betydelsen av de olika klimattillståndens varaktighet, samt att inkludera tänkbara övergångar mellan dem. Om det går att visa att förvaret uppfyller säkerhetskraven givet de olika tänkbara klimattillstånden, samt under övergångar mellan dem, behöver man i analysen av förvarets säkerhet inte ta hänsyn den faktiska framtida klimatutvecklingen i tid och rum.



Forsmark



Laxemar



Figur 21-1. Klimatrelaterade förändringar kan ses som en cyklisk utveckling med en successiv övergång mellan olika klimattillstånd, a) schematisk bild, b) exempel från säkerhetsanalys.

SKB:s angreppssätt går ut på att först konstruera ett huvudscenariot som visar hur klimattillstånden avlöser varandra under en glacial cykel, det vill säga under cirka 100 000 år. Två varianter av huvudscenariot har valts ut och analyserats. Den första varianten är en rekonstruktion av hur klimatrelaterade parametrar varierade under den senaste glaciala cykeln (cirka 100 000 år). I den andra varianten dominerar initialt ett varmare klimat, orsakat av en ökad växthuseffekt. I huvudscenariots båda varianter är syftet att beskriva hur parametrar som inlandsistjocklek, permafrostmäktighet och strandlinjeförskjutning varierar med tiden. Eftersom det inte är möjligt att beskriva en förväntad klimatutveckling under de kommande 100 000 åren, ska de två varianterna av huvudscenariot inte ses som försök att förutsäga framtida klimatutvecklingar. De är i stället exempel på framtida utvecklingar som beskriver klimatrelaterade processer på ett realistiskt och integrerat sätt i ett 100 000-årsperspektiv.

Förutom att huvudscenariot används vid analysen av den långsiktiga säkerheten, utgör det även en lämplig vetenskaplig utgångspunkt för en utökad analys av klimatets påverkan på förvaret. Baserat på utvecklingen i huvudscenariot, och på vår kunskap om förvarets funktion och säkerhet, väljs ett antal övriga scenarier ut på ett strukturerat sätt. De övriga scenarierna täcker in alla tänkbara situationer där klimatrelaterade processer påverkar förvarets funktion, men som inte täcks i huvudscenariot. Dessa scenarier innehåller alternativa platsspecifika klimatutvecklingar som beskriver mer extrema klimat, i termer av amplitud eller utsträckning i tiden. Detta ger möjlighet att analysera förvarets funktion vid exempelvis tjockare inlandsisar eller djupare permafrost än i huvudscenariot.

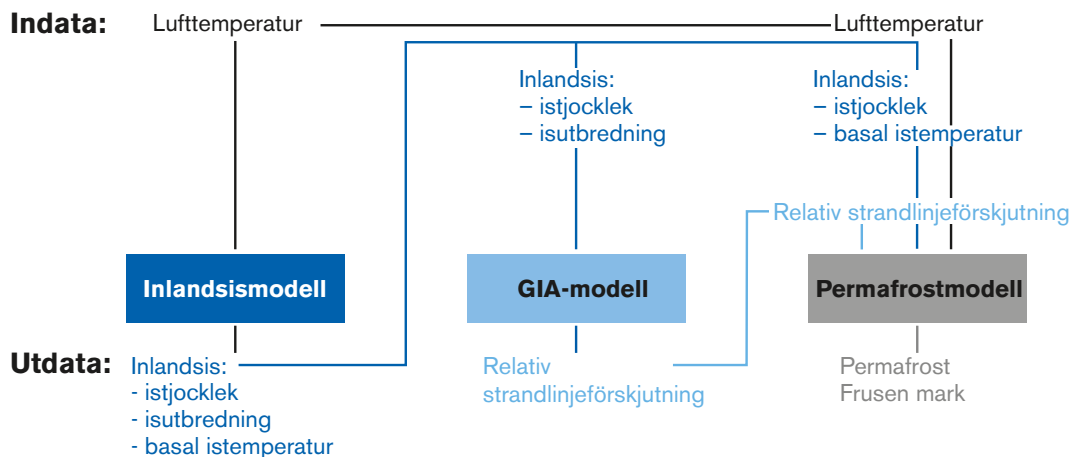
Trots att det fortfarande finns osäkerheter i hur den senaste glacialen påverkade den fennoskandiska urbergsskölden, så är en rekonstruktion av förhållandena under den senaste glacialen, Weichsel, mycket lämplig och relevant för att konstruera huvudscenariot. Weichsel är den glacial som vi har störst kunskap om. Denna kunskap ger oss bland annat möjligheter att med hjälp av geologisk information testa och kalibrera de modeller vi använder oss av vid till exempel rekonstruktionen av inlandsisens utbredning och tjocklek. I linje med resonemanget ovan, är syftet med rekonstruktionen av Weichselperioden inte att producera en ”sann” bild av hur den senaste glacialen gick till, utan i stället att definiera en vetenskapligt god startpunkt för vidare analyser av hur klimatrelaterade processer kan påverka förvarets säkerhet.

Klimatscenariot med ett antropogent påverkat klimat på grund av en ökad växthuseffekt inkluderar en global höjning av havsytan orsakad av en ökad avsmältning av framför allt den grönländska inlandsisen. Detta är nödvändigt med tanke på att både Oskarshamn och Forsmark ligger i direkt anslutning till dagens kustlinje.

Inlandsisens utbredning i Skandinavien avgör hur de rådande klimattillstånden avlöser varandra i huvudscenariot. År 2002 inleddes därför projektet ”Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi”, som i första hand syftar till att studera inlandsisen under den senaste glaciala perioden. Projektet omfattar en sammanställning av glacialgeologisk information för Weichsel, inlandsismodellering samt processtudier av inlandsisars hydrologi. Simuleringar av den skandinaviska inlandsisen med hjälp av en numerisk termodynamisk inlandsismodell har varit ett nyckelprojekt i SKB:s klimatprogram. Projektet är nu i sin slutfas och vunnit kunskap redovisas närmare i avsnitt 21.2.

Beskrivningen av inlandsisens utveckling under den senaste glaciala cykeln har i sin tur använts för att studera strandlinjeförskjutning (se avsnitt 21.3), permafrost (se avsnitt 21.4) och förekomst av glaciala skalv (se avsnitt 26.2.7). Resultaten från modellstudierna, se figur 21-2, har använts för att konstruera huvudscenariot där dessa klimatrelaterade parametrar ingår. Som tidigare nämnts har analysen av huvudscenariot även legat till grund för ett urval av alternativa klimatutvecklingar, för vilka utvecklingen hos de relevanta klimatrelaterade processerna också har analyserats.

För att öka förståelsen av den förändring och variabilitet som vi kan förvänta oss av klimatet i framtiden har SKB under perioden även genomfört två egna studier inom området klimatvariationer. Ett projekt har syftat till att studera klimatutvecklingen i Sverige under de senaste 1 000 åren av interglacial värmeperiod, bland annat för att studera klimatets variabilitet, se avsnitt 21.5. Det andra projektet syftade till att sammanställa nordeuropeiska klimatarkiv som täcker perioder längre än 10 000 år, se avsnitt 21.5.



Figur 21-2. Schematisk bild av de modeller som använts för att rekonstruera förhållandena under den senaste glaciala cykeln, samt flödet av data mellan dem. Gia står för Glacial Isostatic Adjustment.

I granskningen av Fud-program 2004 stöder SSI SKB i avgränsningen av frågor som är av speciellt intresse i samband med glaciationen, såsom möjligt djup på permafrost, förekommande vattentryck och vattenflöden, möjlig nedträngning av glacialt smältvatten samt upptransport av djupa salta grundvatten, förändringar av bergspänningar och benägenhet till bergörelser, samt kopplingar mellan hydrologiska och mekaniska processer. Med nuvarande angreppssätt och säkerhetsanalytiska metodik utgör de identifierade klimatrelaterade tillstånden – och deras utveckling i tid och rum i de utvalda klimatscenerierna – en bas för analysen av hela förvarets säkerhet. Klimatet är på detta sätt nu en integrerad del i säkerhetsanalysen. Dessutom genomgår klimatdelarna även en Fep-analys i säkerhetsanalysen /21-1/.

Framtida och historisk klimatutveckling är forskningsområden som genomgår snabb utveckling. SKB följer därför fortlöpande aktuell forskning i internationella vetenskapliga tidskrifter, på vetenskapliga möten, samt arbetet inom organ eller organisationer som behandlar klimat, till exempel IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

21.2 Inlandsisdynamik och glacial hydrologi

Det glaciala klimattillståndet definieras som områden som täcks av glaciäris, det vill säga av glaciärer eller inlandsisar. De viktigaste forskningsområdena är inlandsisdynamik och glacial hydrologi. I det glaciala klimattillståndet råder normalt sett ett kallare klimat än i permafrost- respektive tempererat klimattillstånd. Klimatet är däremot inte nödvändigtvis torrare eller fuktigare. I Sverige råder i dag glacialt tillstånd endast på vissa platser i fjällkedjan där det finns glaciärer.

En typisk kvartär glacial cykel omfattar en tidsperiod av omkring 100 000 år. Under glaciationscykeln bildas en inlandsis som periodvis täcker delar av den fennoskandiska urbergsskolden. Inlandsisens tillväxt börjar i fjällkedjan genom att mindre glaciärer växer ihop och bildar en större sammanhängande is, som till sist täcker även låglandet utanför fjällkedjan. Under de senaste glaciala cyklerna har isen sin sydliga front i norra Tyskland och Polen vid sitt maximala skede. Då dominerar hela Sverige av det glaciala klimattillståndet. Medelutbredningen hos en typisk kvartär inlandsis är dock betydligt mindre än så. Isranden ligger avsevärt längre norrut, på låglandet relativt nära fjällkedjan. Under en sådan kvartär medelutbredning är Forsmark och Oskarshamn isfria områden. I stort sett utgör avsmältningen av en fennoskandisk inlandsis ett omvänt förlopp mot tillväxtfasen. De sista resterna av inlandsisen återfinns vid fjällkedjans högst belägna delar.

Inlandsisens termiska och hydrauliska egenskaper vid botten bestämmer hur isen påverkar sitt underlag och därmed också hur den påverkar slutförvaret. Isen kan vara bottenfrusen, varvid temperaturen i de basala delarna befinner sig under trycksmältpunkten. Den kan också vara bottenmältande, varvid den basala isen befinner sig vid trycksmältpunkten.

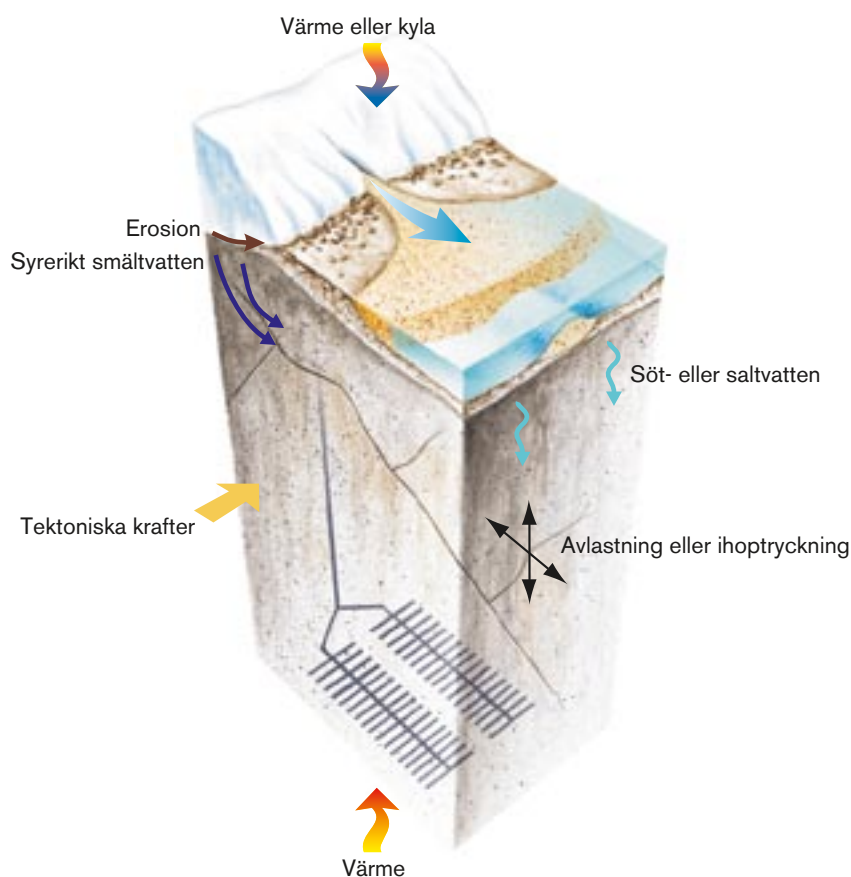
I det första fallet kan det förekomma permafrost under inlandsisen. I det bottenfrusna fallet finns inget fritt vatten under isen. Därför sker heller ingen subglacial grundvattenbildning. En bottenfrusen is påverkar förvaret främst genom att den med sin tyngd ger ett tillskott till det hydrostatiska trycket på förvarsdjup. Den påverkar även spänningsförhållandena i jordskorpan vid tillväxt och deglaciation.

En bottenmältande inlandsis ger däremot även ett tillskott till grundvattenbildningen genom det smältvatten som bildas under isen. I frontnära delar av inlandsisen når dessutom smältvatten från ytan ner till underlaget genom glaciärsprickor och glaciärbrunnar. Även detta vatten, med betydligt större kvantiteter och med större variation i vattentryck än det basalt genererade vattnet, bidrar till grundvattenbildningen och variationer i hydrostatiskt tryck i berggrunden. Det glaciala smältvattnet är mycket jonfattigt och syrerikt. Grundvattenbildningen under perioder med glacialt klimattillstånd medför därför att vatten med sådana egenskaper transporteras nedåt i berget. En del av SKB:s arbete går därför ut på att studera hur grundvatten bildas och transporteras genom berget under glaciala betingelser, se avsnitt 26.2.3, samt hur ett grundvatten med glacialt ursprung påverkar till exempel buffertlerans egenskaper, se kapitel 24.

När en inlandsis växer till och drar sig tillbaka påverkas bergsspänningarna i det berörda området, vilket eventuellt skulle kunna ge en reaktivering av befintliga sprickzoner i form av glaciala skalv, se avsnitt 26.2.7. Figur 21-3 ger en översikt över de processer som studeras inom det glaciala tillståndet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI uppskattade att SKB i ett första steg inriktar sig på Weichselglaciationen, men påpekade också att SKB behöver redogöra för alternativa klimatutvecklingar. Kasam påpekade att även spår av andra istider än den senaste bör beaktas i SKB:s arbete. Vidare uppskattade Kasam SKB:s intentioner att bearbeta frågeställningar kring subglacial dränering och hydrologi.



Figur 21-3. I samband med att en inlandsis växer till och drar sig tillbaka förändras temperatur, hydrologiska förhållanden, bergsspänningar och grundvattensammansättning.

SKI påpekade att SKB endast kortfattat redovisar hur förändringar i hydrologi under permafrost och glaciala tillstånd kommer att hanteras. SKI noterade vidare att det viktigaste målet bör vara att identifiera skillnader mellan ett framtida klimat tillstånd och befintligt klimat samt att analysera konsekvenserna, till exempel saltutfrysning och kanalisering av grundvattenflöde. SSI ansåg att prognoser bör göras för såväl naturlig som störd grundvattenbildning vid tänkbara framtida klimatförändringar.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Som nämnts ovan beskriver SKB i sitt nuvarande klimatprogram dels ett huvudscenario som innehåller en rekonstruktion av förhållandena under senaste glaciala cykeln, dels alternativa klimatutvecklingar. De alternativa utvecklingar som nu utretts är:

- Ett kallare och torrare klimat än i referensfallet, vilket resulterar i mer och djupare permafrost, se avsnitt 21.4.
- Ett kallare klimat med nederbörds mängder som kan bygga upp en tjockare inlandsis än under den senaste glaciala cykeln, se nedan i detta avsnitt. Här utnyttjas även spår av andra nedisningar än den senaste, vilket efterlysts av Kasam.
- Ett framtida klimat varmare än under den senaste glaciala cykeln, se avsnitten 21.3 och 21.5.

Det projekt som inleddes år 2002 och syftade till att studera den senaste inlandsisens bottenförhållanden och hydrologi omfattar sammanställning av glacialgeologisk information, numerisk inlandsismodellering samt processtudier av inlandsisars hydrologi.

Glacialgeologisk information

Sammanställningen av glacialgeologisk information redovisas i /21-2/. Sammanställningen genomfördes dels för att få en bild av nuvarande kunskapsläge vad gäller den glaciala historien under senaste glaciala cykeln, dels för att sådan information skulle kunna användas för att kalibrera isutbredningen i den inlandsismodell som användes vid rekonstruktionen av Weichselisen. Sammanställningen visar att det fortfarande finns frågetecken kring inlandsisens utbredning under den tidiga och mittersta delen av Weichsel. Den bild som dock blivit allt tydligare under senare år är att inlandsisen har ett mer dynamiskt beteende än vad som tidigare antagits, med stora variationer i iskonfiguration under den glaciala cykeln, till exempel under det så kallade Marina Isotopstadium 3 (Mis 3) för 59 000 till 24 000 år sedan /21-2/. Kunskapen om isens konfiguration och utveckling för senaste glaciala maximumet för cirka 20 000 år sedan och den efterföljande deglaciationen av Skandinavien är relativt sett goda.

Numerisk inlandsisimulering

Nuvarande kunskapsläge för teorierna kring inlandsisdynamik har sammanställts och avrapporterats i /21-3, avsnitt 3.1/.

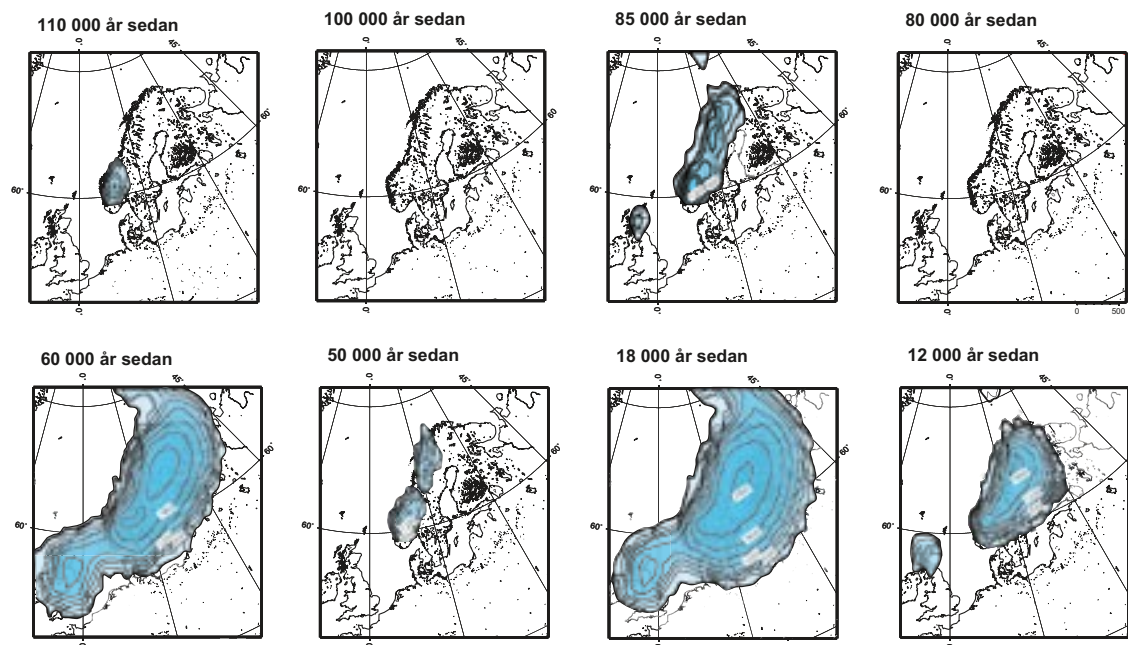
Vid rekonstruktionen av Weichselisen utnyttjades i huvudsak inlandismodellen Umism (University of Main Ice Sheet Model) /21-4, 21-5, 21-6/. Det är en termodynamisk non-steady-state modell som kan simulera beteendet hos inlandsisar som normalt inte befinner sig i jämvikt med det rådande klimatet. Umism genererar resultat i linje med övriga moderna inlandsismodeller /21-7/. Förutom de klimatdata som används vid inlandsisimuleringar av den fennoskandiska inlandsisen, har en ny typ av datauppsättning arbetats fram för att användas som indata till simuleringarna av Weichselisen. Datauppsättningen beskriver med hög upplösning den rumsliga variationen i geotermiskt värmefflöde över Sverige och har tagits fram i samarbete med SGU /21-3, 21-8/. Eftersom variationen hos det geotermiska värmefflödet är betydelsefullt för isens bottenförhållanden /21-8, 21-9/, är en sådan datauppsättning viktig för att minska osäkerheterna i modellens beräkningar av basala istemperaturer och associerade basala smälthastigheter. Före denna studie hade aldrig en rumsligt variabel datauppsättning använts vid numeriska simuleringar av inlandsisar. Tidigare har ett enda antaget värde på värmefflödet använts för hela modelldomänen. Resultaten visar att om syftet med modellstudien är att undersöka en inlandsis basala termiska och hydrologiska egenskaper på regional och lokal nivå,

är det nödvändigt att inkludera ett sådan realistisk, rumsligt varierande, geotermiskt värmeflöde /21-8/. Exempel på resultat från rekonstruktionen av Weichselisen ses i figur 21-4. Resultaten av Weichselrekonstruktionen visar att inlandsisens tillväxt sker i ett antal faser med mellanliggande perioder av mer begränsad isutbredning.

Inlandsismodellen användes även till att studera extrema klimat inom den glaciala domänen, i det här fallet för att studera de maximala istjocklekar som kan förekomma i Forsmark och Oskarshamn. I denna delstudie simulerades bland annat den största möjliga istjocklek som förekommit under de senaste två miljoner åren i Skandinavien (under Saaleglaciationen), för att se hur stort det extra hydrostatiska trycket på förvarsdjup blir. Dessutom genomfördes ett antal känslighetsstudier i vilka den maximala istjockleken på de två platserna studerades i ett antal fall med kallare klimat, där isen tilläts växa till jämvikt med klimatet. Resultaten visar att den maximala förväntade istjockleken över platserna är 2 600 meter i Laxemar och 3 200 meter i Forsmark, vilket motsvarar ett extra hydrostatiskt tryck på 23 respektive 28 MPa. För en detaljerad diskussion av maximala istjocklekar och associerade maximala bidrag till hydrostatiskt tryck på förvarsdjup, se Klimatrapporten till SR-Can /21-3, avsnitt 4.4.2/. Resultaten från inlandsissimuleringarna har även använts vid sammanställningen av klimatscenerierna i SR-Can /21-3, avsnitt 4.2 och 21-10, avsnitt 9.4/.

För att kunna beskriva ett huvudscenario där alla klimatrelaterade processer av vikt för förvarets funktion är inkluderade, användes variationen i isutbredning och islasthistoria från inlandsrekonstruktionen som indata i modellsimuleringarna av strandlinjeförskjutning och permafrost, se avsnitt 21.3 respektive 21.4, samt i studier av glaciala skalv, se avsnitt 26.2.7. Utdata från inlandsrekonstruktionen (basala smälthastigheter och istjocklek) användes även för simuleringar av grundvattenhydrologi och -kemi (salinitet) under glaciala förhållanden, se avsnitt 26.2.

I samband med glaciationer är även kopplingar mellan mekaniska och hydrauliska processer betydelsefulla. Mekaniska processer som kan ge upphov till glaciala skalv är till exempel beroende av grundvattnets portryck, vilket kan påverkas vid nedisningar. Mekaniska processer behandlas vidare i avsnitt 26.2.



Figur 21-4. Exempel på iskonfigurationer och isytans nivå (300 meter ekvidistans) från en rekonstruktion av Weichselglaciationen /21-3/.

Processtudier av inlandsisars hydrologi

En sammanställning av nuvarande kunskapsläge inom området glacial hydrologi har genomförts och rapporteras i /21-3, avsnitt 3.2/, samt i /21-11/. Den senare rapporten utgör en omfattande sammanställning av den teoretiska kunskapen om hur vatten flödar i och under en glaciär eller inlandsis, samt hur dessa teoretiska kunskaper i dagsläget tillämpas i modellsimuleringar av inlandsishydrologi. Rapporten syftar till att presentera kunskapsläget inom området, men även till att identifiera de luckor som i dag finns i vår förståelse av inlandsishydrologi. Huvudproblemet är att de glacialhydrologiska processer som sker i relativt liten skala är svåra att konceptualisera i dagens storskaliga inlandismodeller. Den viktiga kopplingen mellan det komplexa och rumsligt över tiden mycket variabla glaciala hydrologiska systemet samt dynamiken och flödet hos inlandsisar saknas därför till stor del i dagens modeller.

Mot bakgrund av möjligheten att utnyttja den grönländska inlandsisen som en analogi för den skandinaviska inlandisen genomfördes sommaren 2005 en preliminär rekognoscering på Grönland. SKB har i samband med detta även etablerat kontakter med Geus (Danmarks och Grönlands Geologiska Undersøgelse). SKB fortsätter att bevaka möjligheterna inom detta område.

Program

Fortfarande finns relativt stor osäkerhet i de geologiska tolkningarna av när, var och hur långa isfria perioder (interstadialer) som förekom under den senaste glacialen i Skandinavien. SKB kommer enligt planerna att studera hur vissa specifika delar av den senaste glacialen gick till i Skandinavien för att minska nuvarande osäkerhet i de geologiska tolkningarna. Därför planeras dateringar och korrelationer av befintliga interstadiala sedimentprover och lagerföljder från utvalda nyckellokalor i Sverige, bland annat för att ge säkerhetsanalysen ett bättre underlag för det scenario som baserats på en upprepning av Weichselglaciationen.

Inom området inlandsisdynamik och glacial hydrologi avser SKB att arbeta vidare med att studera hur den glaciala hydrologin kan och bör konceptualiseras i planerade grundvattenhydrologiska studier, se avsnitt 26.2.3. Arbetet tar avstamp i erfarenheterna från grundvatten- och glacialhydrologiska studier bedrivna under den gångna perioden /21-12/, samt i nuvarande kunskapsläge beskrivet under rubriken processtudier ovan. I detta sammanhang planerar SKB även att genomföra ett projekt på Grönland som syftar till att använda den grönländska inlandsisen som en analogi för den situation vi förväntar oss vid en framtida nedisning av Forsmark och Oskarshamn. Resultaten skulle öka vår förståelse av de hydrologiska och geokemiska förhållandena i och omkring en inlandsis, och specifikt adressera frågor kring hur en inlandsis påverkar grundvattenflöde och kemi kring ett slutförvar. Projektet är tänkt att utföras på västra Grönland i ett område i närheten av samhället Søndre Strømfjord (Kangerlussuaq). I denna region finns bergarter, framför och under inlandsisen, som uppvisar stora likheter med bergarterna vid Forsmark och Oskarshamn. Likheten är en förutsättning för att studierna ska vara meningsfulla och ge önskad information om hydrologi och hydrokemi i anslutning till en inlandsis. Projektet är tänkt att genomföras i samarbete med Posiva.

SKB har även för avsikt att fortsätta arbetet med att analysera vilka fall av islasthistoria som bör väljas vid planerade studier av jordskalv, se avsnitt 26.2.7.

Projektet ”Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi” planeras att slutföras under 2007.

21.3 Isostatiska förändringar och strandlinjeförskjutning

Strandlinjeförskjutning är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett förvar inom det tempererade klimattillståndet. Det tempererade klimattillståndet definieras som en situation utan inlandsis eller permafrost. Det utgörs med andra ord av områden med ett tempererat klimat i vid bemärkelse, med kalla vintrar och antingen kalla eller varma somrar. Det tempererade klimattillståndet har ett varmare klimat än det glaciala klimattillståndet och permafrosttillståndet. Enligt denna definition råder det tempererade klimattillståndet i dag i hela Sverige, med undantag av delar av fjällkedjan.

Strandlinjens läge påverkar de hydrologiska randvillkoren för slutförvaret. Salthalten i det hav, det innanhav eller den sjö som motsvaras av dagens Östersjön påverkas också av strandlinjens läge, framför allt i inloppen i de södra delarna. Studier inom biosfärsprogrammet har tidigare visat att även sötvattentillrinningen är viktig för Östersjöns salthalt /21-13/.

I det klimatscenario som beskriver en framtida klimatutveckling med ett varmare klimat, orsakat av en ökad växthuseffekt, utgörs de första cirka 60 000 åren av scenariot vid Forsmark och Oskarshamn av tempererat klimattillstånd. Därefter blir klimatet successivt kallare, med till en början korta, men med tiden allt längre, perioder av permafrost vid de två undersökta platserna. I slutet av detta cirka 100 000 år långa scenario kommer den första perioden av glaciala förhållanden. I verkligheten skulle en utveckling av ett varmt växthusklimat kunna medföra en initial period med tempererade förhållanden som varar både längre eller kortare än i det valda scenariot. Ett globalt varmare klimat skulle dessutom kunna innebära att man regionalt över Skandinavien skulle kunna erhålla ett kallare klimat än i dag, orsakat av omläggningar i den termohalina cirkulationen i Nordatlanten. Hanteringen av dessa komplexa frågeställningar finns beskriven i /21-3, avsnitt 4.3/.

Kunskaperna är goda om förhållanden och processer inom det tempererade klimattillståndet och deras betydelse för förvarets säkerhet och förhållanden i biosfären.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI uppskattade att SKB startat projekt för att förstå orsakerna till strandlinjens läge. SKI påpekade att en eventuell framtida avsmältning av inlandsis på grund av global uppvärmning, och betydelsen av detta för slutförvarsplatserna, behöver redovisas i kommande säkerhetsanalyser. Även Kasam delade denna syn genom att påpeka att klimatförändringar i perspektivet några hundra till tusen år kan vara av intresse med tanke på risk för global uppvärmning och höjning av världshavens nivå, ökad nederbörd och stigande grundvattennivå. SSI ansåg att det är angeläget att belysa framtida havsnivåförändringar och huruvida dessa skulle kunna leda till frigörelse av ackumulerad aktivitet i havssediment.

Kasam påpekade att prognoser bör göras för såväl naturlig som störd grundvattenbildning vid tänkbara framtida klimatförändringar.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Nuvarande kunskapsläge för teorierna kring isostatiska förändringar och strandförskjutning har sammanställts och rapporterats i /21-3, avsnitt 3.3/.

De punkter som SKI, SSI och Kasam påpekar ovan behandlas alla i klimatscenariot med ett antropogent påverkat varmare klimat på grund av en ökad växthuseffekt, se nedan.

Ett projekt där Global Isostatic Adjustment (Gia) modellering är en central del, och vars syfte är att förstå och kvantifiera strandlinjeförskjutning, inleddes 2004. Strandlinjeförskjutning har en isostatisk och en eustatisk komponent, det vill säga förändringar i nivån för jordskorpan respektive havsytan. Processerna måste studeras globalt, vilket kan göras med Gia-modeller /21-14 och 21-15/. I detta projekt användes en tvådimensionell Gia-modell framtagen vid University of Durham /21-14, 21-15 och 21-16/. De fall som analyserats med Gia-modellen är:

- Huvudscenariot baserat på repetitionen av Weichselperioden.
- Scenariot med varmare klimat på grund av ökad växthuseffekt.
- Känslighetsstudier.

För att undvika problem med att jordskorpan initialt är i hydrostatisk jämvikt i Gia-simuleringarna, simulerades två på varandra följande glaciala cykler i de båda första fallen ovan, varvid resultat endast användes från den senare cykeln. Dessutom utgör strandlinjeförskjutningskurvan under de första 7 000–10 000 åren i dessa två scenarier inte data från Gia-modellen, utan består i stället av extrapolerad information från dagens observerade trender för platserna /21-17 och 21-18/, i linje med myndigheternas anvisningar. Variationer i islast över tiden är viktiga indata till Gia-simuleringarna.

Därför användes för det lokala fallet (fennoskandiska inlandsisen) information om istjockleksvariationer från inlandsisimuleringarna som indata, se figur 21-2, medan annan information användes som indata för variationer i islast i områden på stora avstånd, till exempel i Nordamerika. Även variationer hos exempelvis den nordamerikanska inlandsisen påverkar de isostatiska förhållandena och strandlinjeförskjutningen i Sverige. Bakgrund, metoder och resultat från Gia-studierna redovisas i /21-3, avsnitt 21.3/.

Resultaten från Gia-simuleringarna har använts vid sammanställningen av klimatscenerierna i SR-Can /21-3, avsnitt 4.2 och 4.3, samt 21-10, avsnitt 9.4 och 9.6/. Trots att osäkerheterna i Gia-resultaten i vissa fall är relativt stora, visar resultaten för huvudscenariot att landhöjningen vid de båda platserna kommer att fortsätta under 40 000–50 000 år, innan nästa period av nedisning inträffar i scenariot. Den återstående landhöjningen är i storleksordningen 20–35 meter, med de högre värdena i Forsmark och de lägre i Oskarshamn.

I klimatsceneriet med en ökad växthuseffekt ingår en total avsmältning av den grönländska inlandsisen, det vill säga den för temperaturökningar mest känsliga av dagens inlandsisar. Avsmältningen av den grönländska inlandsisen motsvarar en global höjning av havsytan på cirka sju meter. Resultaten från Gia-simuleringarna visar att landhöjningen fortsätter vid de två platserna, liksom i huvudscenariot, trots avsmältningen av den grönländska inlandsisen. Den isostatiska återhämtningen är snabbare än höjningen av havsytan, vilket resulterar i att markytan ovan förvaret i detta scenario befinner sig över havsytan i mer än 100 000 år på båda platserna. Landhöjningens omfattning är däremot osäker, bland annat på grund av osäkerheterna i framtida faktiska höjningarna av havsytan.

Scenariot med ett varmare klimat på grund av ökad växthuseffekt, med sin mycket långa period av tempererade förhållanden, bedöms som huvudsakligen positivt för förvarets funktion /21-10, avsnitt 9.6/.

I en avslutande del av Gia-projektet analyserades effekten av att inkludera en 3D-beskrivning av jordmodellen, i stället för en lateralt homogen jordmodell, vilket utnyttjats i studierna ovan. Preliminära resultat visar att effekten av att inkludera en lateralt varierande tjocklek på jordskorpan i hög grad minskar felmarginalerna i beräkningarna av isostatisk höjning och resulterande strandlinjeförskjutning /21-19 och 21-20/.

Program

SKB har för avsikt att komplettera nuvarande kunskap med de förfinade prognoserna för havsyttehöjningar i samband med varmare klimat /21-21/, samt att inkludera kommande vetenskapliga resultat och sammanställningar kring klimattutveckling, inlandsisar och variationer i havsytans nivå i klimatsceneriet med ökad växthuseffekt.

21.4 Permafrosttillväxt

Klimatillstånd med permafrost råder i områden där markens temperatur befinner sig vid eller under 0 °C under hela året. Det är områden med ett kallt klimat men utan inlandsis. Oftast har permafrosttillståndet ett klimat som är kallare än det tempererade klimattillståndet, men varmare än det glaciala tillståndet. I Sverige återfinns i dag permafrostklimattillstånd i delar av fjällkedjan, där permafrost förekommer diskontinuerligt eller sporadiskt.

Permafrost påverkar både grundvattnets flödesmönster och sammansättning, det senare genom saltutfrysning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Kasam uppskattade SKB:s intentioner att bearbeta frågeställningar kring permafrost. SKI påpekade att SKB borde ha en mer omfattande beskrivning av permafrost, eftersom den är viktig för buffertens säkerhetsfunktioner. SKI noterade vidare att osäkerheterna i beräknade permafrostdjup bör värderas noggrant, särskilt i ett slutförvar i Forsmark på ett djup av cirka 400 meter.

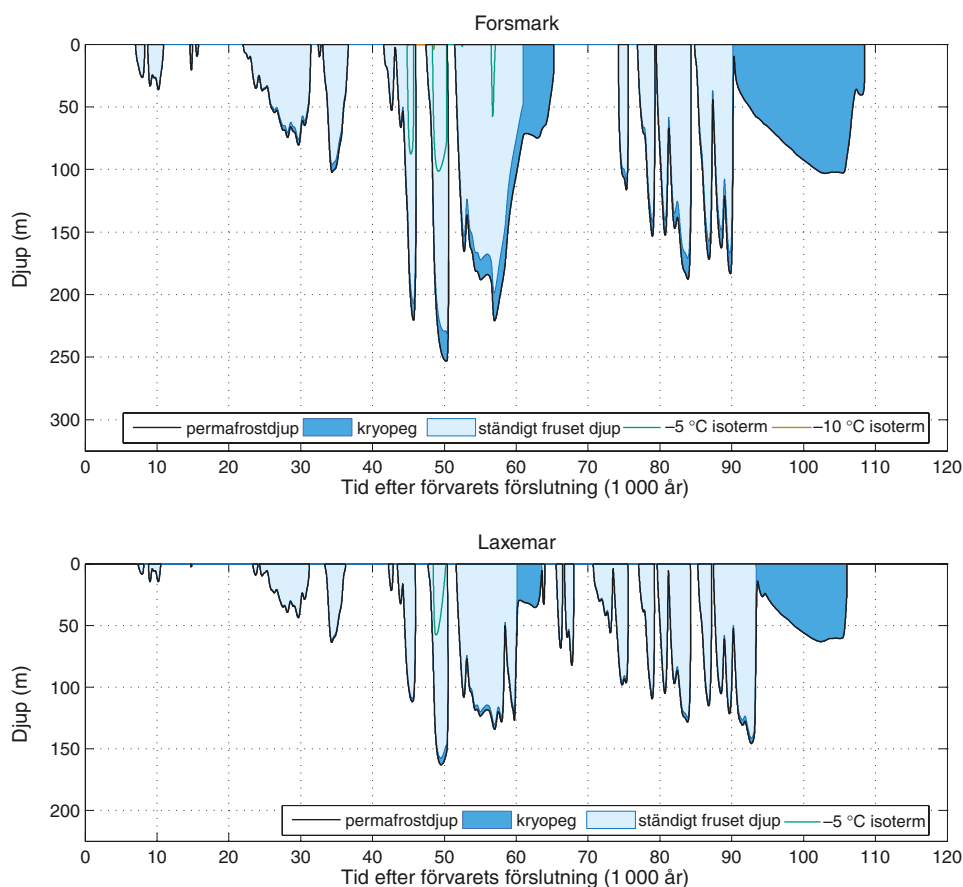
Nyvetenskap sedan Fud 2004

Det nuvarande kunskapsläget kring teorierna för permafrostbildning har avrapporterats i /21-3, avsnitt 3.4/.

Tänkbara permafrostdjup har studerats för både Forsmark och Oskarshamn. Studierna genomfördes med en kvalificerad numerisk endimensionell permafrostmodell utvecklad vid Helsingfors universitet /21-22/. Studien bestod av två huvuddelar. I den första delen identifierades och undersöktes faktorer som kan påverka permafrostutveckling, till exempel förekomst av jordlager, vegetation, snötäcke, sjöar och temperaturklimat. I den andra delen studerades, mot bakgrund av uppnådda resultat, permafrost på de båda kandidatplatserna under ett antal klimatscenarier, bland annat för rekonstruktionen av senaste glaciala cykeln. I dessa studier utnyttjades plats-specifika parametrar av betydelse från platsundersökningarna, till exempel bergets termiska konduktivitet och värmekapacitet. Även känslighetsstudier för olika klimatutvecklingar och termala egenskaper hos berget genomfördes. Dessa känslighetsstudier bedöms täcka in den variation som behövs för att motivera att den valda 1D-approachen är tillräcklig, jämfört med om studierna skulle vara gjorda i 3D.

Platsspecifika analyser gjordes även av hur värmen från det deponerade bränslet påverkar utvecklingen av permafrost på respektive plats med platsanpassad förvarslayout. Viktiga indata i permafrostanalyserna utgjordes av information från inlandsismodelleringen, se avsnitt 21.2, och modelleringen av strandlinjeförskjutning, se avsnitt 21.3. I huvudscenariot når permafrosten som djupast 250 meter i Forsmark och 160 meter i Laxemar. Exempel på resultat från permafroststudien ges i figur 21-5.

I tillägg till permafrostutveckling i huvudscenariot, se figur 21-5, analyserades permafrostutveckling i extremare klimat, även detta genom modellering av permafrostdjup. I det här fallet beräknades permafrostdjup för ett klimatscenario som var exceptionellt gynnsamt för permafrosttillväxt.



Figur 21-5. Beräknade permafrostdjup för Forsmark och Laxemar för den senaste glaciala cykeln. Med kryopeg menas mark som inte är frusen, men där temperaturen ändå ligger under nollpunkten.

Här antogs att klimatet var lika kallt som under den senaste glacialen, men betydligt torrare. Ingen inlandsis kunde bildas och täcka, och därmed isolera, marken. Vidare antogs att inget isolerande snö- eller vegetationstäckte förekom under året, samt att hav aldrig täcker platserna. Resultaten från beräkningen i detta pessimistiskt valda klimatscenario visar att lägsta temperaturen på förvaringsdjup är $-0,7\text{ °C}$ i Forsmark och $+6,1\text{ °C}$ i Laxemar. Tillsammans med känslighetsstudierna av permafrostens beroende av temperaturen visar resultaten att temperaturen på förvaringsdjup inte blir så låg att den kan generera frysning av buffertleran på förvaringsdjup på respektive plats /21-10, avsnitt 12.4/. Detta gäller både periglacial permafrost framför inlandsisen, och permafrost under inlandsisen.

Beräkningar genomfördes även för att studera vilket frysinducerat tryck kopparkapseln kan utsättas för om grundvatten, i det pessimistiska klimatfallet, skulle frysa i erosionskaviteter orsakade av buffererosion. Resultaten visar att det maximala frysinducerade trycket är lägre än kapselns kollapstryck /21-10, avsnitt 12.4.4/.

Resultaten från permafroststudien redovisas i /21-3, avsnitt 3.4 och 4.4.1/. Resultaten har bland annat använts vid sammanställningen av klimatscenerierna i SR-Can /21-3, avsnitt 4.2 och 21-10, avsnitt 12.4/. En mindre studie av vilket frysinducerat tryck som skulle erhållas vid frysning av grundvatten i erosionskaviteter i bufferten kring kapseln har också genomförts /21-3, avsnitt 4.4.1/. I tillägg till modellstudierna beskrivna ovan har en generisk modellstudie av saltutfrysning vid permafrosttillväxt genomförts /21-23/.

Fältstudier av permafrost och dess betydelse för hydrologi och grundvattensammansättning har genomförts vid Lupingruvan i Kanada tillsammans med Posiva, Nuclear Decommissioning Authority och Ontario Power Generation.

Program

I likhet med planerna för fortsatta studier av grundvattenflöde och kemi under glaciala förhållanden, har SKB för avsikt att analysera effekterna av permafrostens rumsliga utbredning för geohydrologi och geokemi. Ett tänkbart angreppssätt är att genom modellering eller på annat sätt conceptualisera permafrostutbredningen i modelldomänen för kommande simuleringar av grundvattenflödet.

SKB avser även att studera effekten av att återfyllningsmaterialet fryser i deponeringstunnlar och ramp. Till viss del förväntas detta frysa både i referensscenariot och i klimatscenerier som är gynnsammare för permafrost.

SKB planerar vidare att fortsätta stödja och följa fältstudierna av permafrost och dess betydelse för hydrologi och grundvattensammansättning tillsammans med Posiva, Nuclear Decommissioning Authority och Ontario Power Generation.

21.5 Klimat och klimatvariationer

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI påpekade att SKB tydligare bör visa hur man försäkras om att de valda klimatutvecklingarna belyser de viktigaste klimatrelaterade påfrestandena på främst de tekniska barriärernas funktion, till exempel hydrostatiskt tryck, grundvattenkemi och bergrörelser. Kasam förväntade sig att SKB diskuterar Mis 11 (interglacial för 400 000 år sedan med klimat som liknade dagens) i kommande scenarier.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SR-Can behandlar punkten som SKI påpekar ovan genom att alla klimatrelaterade processer nu hanteras genom en systematisk och komplett genomgång av de egenskaper, händelser och processer som är relevanta för de klimatrelaterade frågeställningarna /21-1/.

En sammanställning och syntes av klimatvariationerna inom nuvarande varma interglacial, men även för Weichselperioden, har genomförts och rapporteras /21-24/. Studien belyser klimatvariationer under mellanistider samt tänkbara klimatförhållanden sydost om en inlandsis som delvis täcker Sverige. Studien ger underlag för att sätta gränser inom vilka temperatur och nederbörd varierar under det tempererade klimattillståndet.

Ett projekt vars syfte är att kvantifiera, beskriva och förstå orsakerna till klimatvariationer i Skandinavien under de senaste 1 000 åren har genomförts /21-25/. Ytterligare ett syfte med studien var att utvärdera hur information från olika typer av klimatarkiv kan användas tillsammans med en regional klimatmodell för att beskriva klimatet. Inom projektet analyserades tillgänglig information om klimatvariationer i Sverige under det senaste millenniumet. Resultaten från projektet ger underlag för att beskriva klimatförändringar de närmaste 1 000 åren. Resultaten från projektet visar även variabiliteten i Forsmarks- och Oskarshamnsområdena under de senaste 1 000 åren. Resultaten bidrar till möjligheten att uppskatta storleksordningar på framtida klimatförändringar. Delar av studien är även publicerad /21-26/.

Interglacialen under Marina Isotopstadium (Mis) 11, för cirka 400 000 år sedan, presenteras ofta som analog till dagens varmperiod (Holocen) på grund av likartade banparametrar för jorden och därmed likartade instrålningsförhållanden. I SKB:s klimatprogram finns ingen specifik diskussion och analys av Mis 11. Motsvarande situation finns inkluderad i de två analyserade varianterna av huvudscenariot.

Utvecklingen hos klimatrelaterade parametrar i ett varmare klimat påverkat av en ökad växthuseffekt finns sammanställda /21-3, avsnitt 4.3/. SKB:s bedömning är att en förlängd period av isfria varma förhållanden i huvudsak är fördelaktigt för förvarets funktion /21-10, avsnitt 9.6.4/.

Program

SKB har initierat två projekt som rör kvantitativa beskrivningar av klimatet i Skandinavien under extrema perioder av den senaste glaciala cykeln. Det första projektet syftar till att kvantitativt studera extrema klimatsituationer genom klimatmodellering med en global klimatmodell och en högupplöst regional klimatmodell. De globala klimatsimuleringarna genomförs vid Meteorologiska institutionen, Stockholms universitet, och de regionala klimatsimuleringarna vid Rossby Centre, SMHI. Det andra projektet syftar till att kvantitativt studera extrema klimatsituationer under den senaste glaciala cykeln från paleodata, genom studier av lakustrina avlagringar. Projektet leds av Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi, Stockholms universitet.

Huvudsyftet med båda projekten är att erhålla en mer nyanserad bild av hur klimatet i Skandinavien kan se ut under specifika perioder av en glacial cykel, till exempel perioder med ett kallt men mycket torrt klimat som är gynnsamt för permafrosttillväxt. De studerade tidsperioderna under den senaste glaciala cykeln är valda så att resultaten från modelleringsprojektet och projektet med paleodata ska kunna jämföras med varandra för att få en ytterligare ökad förståelse av processerna som styr klimatet under en glacial cykel.

Kvantitativa klimatdata är planerade att extraheras för de aktuella klimatperioderna för Forsmarks- och Oskarshamnsregionerna, till exempel för temperatur, nederbörd, avrinning och evapotranspiration. Syftet är att dessa resultat ska kunna användas för att bättre beskriva klimatet under perioder som är gynnsamma för permafrosttillväxt vid de två platserna, samt för SKB:s studier av biosfärsutveckling, se kapitel 27.

Utöver de utvalda perioderna under den senaste glaciationen kommer även klimatet i Skandinavien att simuleras för en framtida period med en ökad halt växthusgaser i atmosfären för att erhålla jämförbar regional klimatinformation för detta klimatscenario. Även här kommer regional information för Forsmark och Oskarshamn att extraheras. Båda klimatprojekten planeras att genomföras under den aktuella perioden.

I tillägg till Fep-hantering av klimat och klimatrelaterade processer kommer resultaten från dessa två studier att användas för att lägga fast att de valda klimatutvecklingarna, framför allt scenariot gynnsamt för permafrosttillväxt och scenariot med ökad växthuseffekt, är adekvata och tillräckligt pessimistiskt valda. Studierna bidrar med andra ord till en ökad förståelse för de mer extrema klimatscenerierna som analyseras i SKB:s klimatprogram, samt till att undersöka realismen i dessa scenarier.

Mot bakgrund av den snabba kunskapsutvecklingen inom klimatområdet – se till exempel /21-27, 21-28, 21-29 och 21-3/ och referenserna däri – planerar SKB att fortsätta följa dessa frågeställningar och utreda konsekvenserna av framtida klimat för ett slutförvar.

22 Bränsle

Det använda bränslet, som ska deponeras i förvaret, kommer från kärnkraftverk. För ett alternativ med 50 års reaktordrift för Forsmark och Ringhals och 60 års reaktordrift för Oskarshamn uppskattas den sammanlagda mängden BWR- och PWR-bränsle till knappt 12 000 ton /22-1/. Till detta kommer 23 ton Mox-bränsle, 20 ton bränsle från Ågestareaktorn samt en del rester från undersökningar av bränsle på Studsvik. Utbränningen kan variera från cirka 15 upp till 60 MWd/kgU. Skillnader i radionuklidinnehåll mellan PWR- och BWR-bränsle är marginella sett ur säkerhetsanalysens perspektiv. Mox-bränsle har högre resteffekt än uranbränsle, vilket medför att mindre mängder kan deponeras i varje kapsel för att kravet på en maximal resteffekt på 1 700 Watt per kapsel ska uppfyllas. När det gäller att bedöma kriticitet blir skillnaderna mellan olika bränsletyper mer betydelsefulla. Därför görs bedömningarna med utgångspunkt från de bränsletyper som är ogynnsammast från kriticitetssynpunkt.

22.1 Initialtillstånd i bränsle/hållrum

22.1.1 Variabler

I säkerhetsanalysen beskrivs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler, som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller inte bara själva bränslet utan även hållrummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. I hållrummen kommer processer som bränsleupplösning och korrosion av gjutjärnsinsatsen att äga rum. Hållrummen skulle alltså kunna ingå i endera systemdelen bränsle eller kapsel och har här inkluderats i bränslet. Variablerna definieras i tabell 22-1.

22.1.2 Geometri

Slutförvaret kommer att innehålla bränsle av olika typer och med olika geometrier.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet skulle bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Tabell 22-1. Variabler för bränslet.

Variabel	Definition
Geometri	Geometriska mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och Zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår.
Strålintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hållrum.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar.
Gapinventarium	Förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser.
Materialsammansättning	De material som bränsleelementets olika delar består av, exklusive radionuklider.
Vattensammansättning	Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hållrum.
Gassammansättning	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hållrum.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.1.3 Strålintensitet

Strålintensiteten beror av radioaktiviteten, det vill säga inventariet av radionuklider och bränslets geometri.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud 2004 fanns inget forskningsprogram om denna process och inga direkta synpunkter på detta framfördes vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Ytterligare beräkningar kan bli aktuella på grund av högre utbränningsgrader.

22.1.4 Temperatur

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 ingick inget forskningsprogram för detta område. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.1.5 Hydrovariabler

Hydrovariablerna, det vill säga vattentryck, vattenflöden och gasflöden är inte relevanta att beskriva initialt, eftersom kapseln förutsätts vara intakt.

22.1.6 Mekaniska spänningar

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 ingick inget forskningsprogram för detta område. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.1.7 Totalt radionuklidinventarium

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SR-Can baserades på samma inventarieberäkningar som SR 97 /22-2/. I Datarapporten /22-3/ till SR-Can konstateras att det är andra faktorer än inventariet som avgör utsläppet av radionuklider från en defekt kapsel. Variationerna i inventarium för en given resteffekt i kapseln är också relativt små för de flesta nuklider.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Inför SR-Site har beräkningar av radionuklidinventariet i ett Mox-bränsle gjorts.

Program

Nya beräkningar av inventarierna kan komma att behövas för bränsle med högre utbränningsgrad.

22.1.8 Gapinventarium

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI påpekar att det är brist på data för den snabba frigörelsen av vissa radionuklider från bränsle. Detta skulle kunna ha ett stort genomslag i konsekvensberäkningar, till exempel när det gäller inverkan av jod-129.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

En analys av data för den del av radionuklidinventariet som segregerats vid gapet mellan bränsle och kapsling eller i korngränser genomfördes. En modell för utsläpp av lättillgängliga nuklider för bränsle med den utbränningsfördelning som analyserats för SR-Can togs fram /22-4/.

Forskning kring fissionsproduktfördelningens utveckling med tiden gjordes inom EU-projekt SFS (Spent fuel stability under repository conditions) och finns redovisad i /22-5/. Flera olika ansatser att modellera strålningsinducerad diffusion gjordes. Med de konservativa diffusiviteter /22-5/ som rekommenderades kan diffusionslängden för fissionsprodukter uppskattas till högst 0,1 till 0,2 mikrometer på en miljon år för bränsle med en utbränning av 55 MWd/kgU. För bränsle från det svenska kärnkraftsprogrammet finns det alltså ingen anledning att anta att en eventuell strålningsinducerad diffusion skulle leda till en ökning av gapinventariet av radionuklider ens efter en miljon år.

I en modellering i atomskala av alfastrålningens materialpåverkan /22-6/ bestämdes koefficienten för strålningsinducerad diffusion i alla beräkningsfall till mindre än 10^{-26} meter per sekund. Detta motsvarar en diffusionslängd av mindre än 0,6 mikrometer på en miljon år. Eftersom diffusionskoefficienten beror av alfaaktiviteten kommer den att avta med tiden och den faktiska diffusionslängden kommer alltså att vara ännu kortare.

Program

Medelutbränningen föreslås öka till 60 MWd/kgU för både BWR- och PWR-bränsle. Konsekvenserna av detta kommer att utredas som underlag för SR-Site.

22.1.9 Materialsammansättning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB beslöt att göra en studie av betydelsen av icke-radioaktiva fissionsprodukter. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Mängderna barium i det använda kärnbränslet kommer att vara flera storleksordningar större än mängden radium, se till exempel /22-7/. Samfällning av radium med barium skulle kunna leda till minskade doser från radium.

Program

Samfällning av radium med barium ska studeras ytterligare inför SR-Site, se även avsnitt 22.2.14.

22.1.10 Vattensammansättning

Vid deponeringsförhållanden där vatten förekommer som ånga, se avsnitt 22.1.11.

22.1.11 Gassammansättning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Konsekvenserna av att mer vatten förs in i kapseln måste utredas. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Genom att byta ut luften i kapseln mot argon kan mängden radiolytiskt producerad salpetersyra begränsas. Då det endast finns mycket lokala områden med dragspänningar kan risken för spänningskorrosionsprickning, som skulle leda till att kapselns hållfasthet minskar, uteslutas.

Program

Med 600 gram vatten i kapseln är mängden vätgas, som kommer att produceras genom korrosion, inte försumbar. Effekterna av vätgasuppbyggnaden på kapselkomponenternas materialegenskaper kommer att undersökas.

22.2 Processer i bränsle/hålrums

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet i bränslet och i kapselns hålrums. Vissa sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga om kopparkapselns isolering bryts och vatten tränger in i kapseln.

22.2.1 Översikt av processer

Radionukliderna i bränslet kommer med tiden att omvandlas till icke-radioaktiva ämnen genom radioaktivt sönderfall och kärnklyvning. Processen ger upphov till alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning. Genom växelverkan med själva bränslet och med omgivande material dämpas strålningen och omvandlas till värmeenergi. Värmetransport i form av värmeledning och värmestrålning ändrar temperaturen i bränslet och värme förs bort till omgivningen. Temperaturförändringen kommer att medföra en viss termisk expansion av bränslets beståndsdelar. Detta kan, i kombination med den heliumbildning som alfastrålningen ger upphov till, leda till brott på bränslets kapslingsrör.

I en intakt kopparkapsel kommer radiolys av restgaser i hålrumsen att leda till att det bildas små mängder korrosiva gaser, som skulle kunna bidra till spänningskorrosion av gjutjärnsinsatsen.

Om kopparkapseln inte är intakt kan vatten transporteras in i kapselns hålrums. Den kemiska miljön förändras därigenom radikalt. Genom radiolys av vattnet i hålrumsen kommer den kemiska miljön att förändras ytterligare. Vattnet i kapseln orsakar korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar i bränslet. Om kapslingsrörens isolering skulle vara bruten initialt, eller brytas genom korrosion eller mekaniska påfrestningar, kommer bränslet i kontakt med vatten. Detta leder dels till att radionuklider som samlats på bränslematrisens yta löses upp, dels till att bränslematrisen löses upp eller omvandlas

och radionuklider frigörs. Radionukliderna kan antingen lösas i vattnet och bli tillgängliga för uttransport eller falla ut i fasta faser i kapselns hålrum. Detta bestäms av de kemiska förhållandena. Vid bränsleupplösningen kan också kolloider med radionuklider bildas.

Vattenlösta radionuklider kan transporteras med rörligt vatten i kapseln (advektion) eller genom diffusion i stillastående vatten. Kolloider med radionuklider kan transporteras på samma sätt. Vattenlösta nuklider kan sorberas till de olika materialen i kapseln. Vissa nuklider kan också transporteras i gasfas.

Slutligen kan vatten dämpa energin hos neutronerna i kapselns hålrum. Lågenergetiska neutroner kan därefter orsaka fission av vissa nuklider i bränslet och på så vis frigöra fler neutroner. Om förhållandena är ogynnsamma kan kriticitet uppnås, det vill säga processen blir självunderhållande.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i bränslet.

22.2.2 Radioaktivt sönderfall

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

En kvalitetsgranskning av data för halveringstider för samtliga radionuklider som är aktuella i säkerhetsanalysen genomfördes till SR-Can. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Halveringstider för samtliga radionuklider som analyserades i SR-Can finns redovisade i /22-3/. Där konstateras att ett par av de halveringstider som använts i beräkningar av radionuklidinventarierna har ersatts med uppdaterade värden.

Program

SKB har inget eget program för att studera halveringstider, men följer den utveckling som sker och uppdaterar databasen när så är nödvändigt.

22.2.3 Stråldämpning/värmealstring

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 ingick inget forskningsprogram för detta område och inga direkta synpunkter fördes fram vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Nya beräkningar av den termiska utvecklingen i och kring kapseln har gjorts inom SR-Can-projektet.

Program

Konsekvenserna för den termiska utvecklingen av ökad utbränning behöver utredas inför SR-Site.

22.2.4 Inducerad fission – kriticitet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

SSI påpekade att SKB bör ytterligare utreda konsekvenserna av vad vatteninträning i kapseln och förändringarna (korrosion, degradering av bränsle och insats samt eventuell borttransport av material) kan ge upphov till med hänsyn till risken för kriticitet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Nya beräkningar kommer att göras för att utreda konsekvenserna för kriticitet av gjutdefekter i kapselinsatsen. Kriticitet för Mox-bränsle behöver också studeras. I samband med de förnyade kriticitetsberäkningarna kommer också SSI:s påpekanden att tas i beaktande.

22.2.5 Värmetransport

Behandlas i avsnitt 22.1.4.

22.2.6 Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation

Processen är starkt kopplad till flera andra processer. Processerna behandlas samlat i avsnitt 23.2.

22.2.7 Termisk expansion/kapslingsbrott

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 ingick inget forskningsprogram för detta område och inga direkta synpunkter fördes fram vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.2.8 Advektion och diffusion

Vattenlösta ämnen i kapselns inre kan transporteras genom advektion och diffusion. Dessa processer diskuteras inte explicit, utan behandlas (ofta pessimistiskt förenklat) integrerat med andra processer. Transport av radionuklider i närområdet behandlas i avsnitt 25.3.

22.2.9 Restgasradiolys/syrabildning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Radiolysberäkningar skulle genomföras för att bestämma om kapseln måste fyllas med en ädelgas för att begränsa radiolytisk bildning av salpetersyra om mängden vatten i kapseln ökar från 50 till 600 gram. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Enkla överslagsberäkningar visade att ett en atmosfär med minst 90 procent argon skulle begränsa mängden bildad salpetersyra till acceptabla nivåer. Se även avsnitt 23.2.10

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.2.10 Vattenradiolys

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Undersökningen av järnkorrosion i initialt syrefritt vatten under gammabestrålning har genomförts under perioden, se avsnitt 23.2.8.

Inga direkta synpunkter framfördes.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Undersökningen är nu avslutad och rapporterad /22-8/. Experimenten utfördes vid två gammadosrater, 300 Gy/h motsvarande dosraten på insidan av gjutjärnsinsatsen och 11 Gy/h motsvarande dosraten på utsidan av gjutjärnsinsatsen. Gammastrålningen ökade korrosionshastigheten med upp till en faktor 30 för Allardvatten och den högsta dosraten. För 11 Gy/h avtog korrosionshastigheten med tiden och var efter 7 000 timmar jämförbar med korrosionshastigheten utan gammastrålning. För 300 Gy/h varade den högre korrosionshastigheten längre och man bedömde att den eventuellt kunde vara permanent.

För en intakt kapsel kommer omfattningen av korrosionangreppet att begränsas av mängden vatten inne i kapseln vid förslutningen och radiolysen kommer bara att påverka korrosionshastigheten.

Program

Inga ytterligare studier är planerade.

22.2.11 Metallkorrosion

Avsnittet avser korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar på bränslet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.2.12 Bränsleupplösning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att kunskaperna om bränslets reaktion vid kontakt med grundvatten har förbättrats avsevärt under senare år. Kunskaperna behöver dock redovisas bättre i form av kvantitativa modellstudier av mekanismer och processer. SKB behöver även redovisa betydelsen av bränsleupplösning vid reducerande betingelser men i frånvaro av höga vätgastryck. SKB bör fortsätta att utveckla och använda processmodeller samt redogöra för resultaten i samband med säkerhetsanalyser, inte för att få en upplösningshastighet utan för att demonstrera en förståelse av processer för extrapolation mot långa tidsskalor samt utgöra underlag för känslighetsanalyser och karakterisering av osäkerheter. SKI ansåg att någon av Chemlabsonderna bör användas för bränsleförsök snarare än aktinidförsök.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Under perioden har en sammanställning gjorts av data om bränsleupplösning under reducerande förhållande och en modell, som beskriver upplösningen av bränslematrisen, har tagits fram för säkerhetsanalysen SR-Can /22-4/.

Experiment med lakning av bränsleprover, tagna från olika segment i en bränslepinne med varierande utbränning från 21 till 49 MWd/kgU /22-9/, visade en svag och nästan linjär ökning av utlakningen (kumulativ frigjord andel) upp till 40–43 MWd/kgU för att därefter minska. I de flesta försök, genomförda under reducerande förhållanden de senaste åren i SKB:s program, har bränsle med utbränning runt 40–43 MWd/kgU använts på grund av den högre förväntade utlakningen. Med hänsyn till den förutsedda ökningen av medelutbränning av bränslet i framtiden är det nödvändigt att genomföra försök med bränsle med utbränning högre än 50 MWd/kgU under olika förhållanden för att förbättra SKB:s dataunderlag.

EU-projektet SFS (Spent fuel stability under repository conditions) avslutades och en sammanställning av resultaten angående bränslematrisupplösning har redovisats /22-10/. Vid slutförvarsförhållanden under de första tiotusen åren förväntas radiolytiska oxidanter producerade från det använda bränslet att förbrukas av höga halter reduktanter i form av tvåvärt järn och vätgas, vilka produceras genom anoxisk järnkorrosion. Efter mycket långa tider kommer den resterande alfaaktiviteten i bränslet att vara så liten att det inte produceras tillräckligt med oxidanter för att orsaka en mätbar oxidation av bränslet /22-11, 22-12 och 22-13/.

I SKB:s program har studier med ganska färskt använt bränsle genomförts i närvaro av olika och relativt höga halter upplöst vätgas eller tvåvärt järn. Färskt använt bränsle har den verkliga materialsammansättningen, men ett mycket högt strålfält jämfört med det som förväntas vid scenarier som inbegriper en eventuell kontakt med grundvatten. Samtidigt har motsvarande studier med alfadopad urandioxid genomförts i närvaro av relativt låga halter reduktanter (tvåvärt järn i närvaro av vätgas – producerad från järnkorrosion – eller sulfidjoner). Alfadopad urandioxid simulerar strålfältet för några tusen år gammalt bränsle bättre.

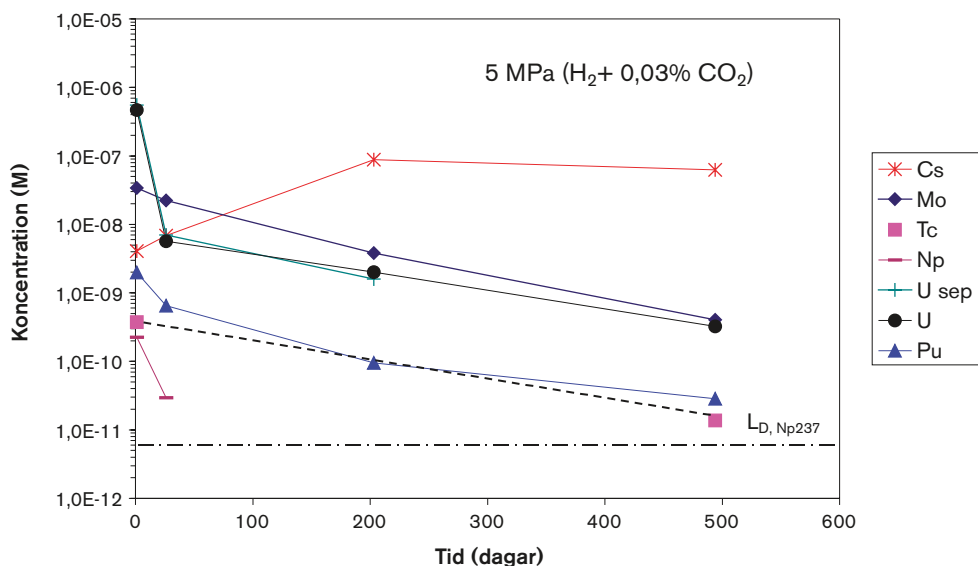
De experimentella studierna av bränslelakning eller av urandioxid dopad med uran-233 i närvaro av 0,05 till 43 mM upplöst vätgas är relativt nya. Resultaten från EU-projektet SFS samt relaterade studier har ställts samman /22-14/. I fallet bränsle gör den verkliga materialsammansättningen och närvaron av icke redoxkänsliga fissionsprodukter det möjligt att bedöma upplösningshastigheten genom deras frigörelse. En systematisk minskning med mer än två tiopotenser av frigjord andel strontium eller cesium under olika tidsintervall observerades under mer än ett år långa försök vid Studsvik. För längre lakningsperioder ökade antalet intervall där inget utsläpp av strontium eller cesium kunde uppmätas. Halterna av nästan alla redoxkänsliga nuklider från ett föroxiderat bränsleskikt minskar med tiden till värden som motsvarar lösligheten av deras reducerade oxider. I vissa fall är halterna av aktinider, som neptunium och plutonium, mycket lägre än uranhalterna. Förhållandet mellan aktinid och uran är ganska nära det i bränslet, trots att lösligheterna av deras fyrvärda oxider är relativt lika. Detta tyder på en möjlig samfällning av neptunium och plutonium med uran.

De första resultaten med lakning av Mox-bränsle uppvisar likheter med försök genomförda med urandioxidbränsle, se figur 22-1. Samma beteende har märkts under det mer än tre år långa försöket som fortsätter att analyseras i samarbete med EU:s transuraninstitut i Karlsruhe, ITU.

För att studera den första fasen av scenariot med en skadad kapsel har bränslesegment med hål gjorda i kapslingen undersökts – i samarbete med ITU – i närvaro av vattenånga under argon- eller vätgasatmosfär. Preliminära data visar på en tryckökning orsakad av radiolys under argon, men för 40 procent vätgas uppmäts däremot ingen tryckökning.

Försök med färskt bränsle och lägre halter vätgas (7, 10 och 30 procent vätgas) har också genomförts. Erhållna data visar att halten icke redoxkänsliga nuklider, som strontium eller cesium, ökar under 10 procent vätgas samt att mätbara halter väteperoxid och syrgas produceras. Detsamma inträffar även med 30 procent vätgas i argon.

Massbalansförsök, där tidsberoendet för bildning av väte och syre har studerats i ett slutet system med från början runt två gram bränslefragment och syrefria lösningar, har avslutats och publicerats /22-15/. För data från långtidsförsök i förslutna glasampuller, som analyserats efter ett, två och



Figur 22-1. Halterna fissionsprodukter och aktinider som funktion av tiden vid lakning av Mox-bränsle.

tre år och där bränsle lakats i närvaro av 10 mM vätekarbonat, visar geokemisk modellering att bildning av sekundära sexvärda uranfaser inte är möjlig. En jämförelse av data från dessa ampuller med beräkningar visar att uppmätta halter av radiolysprodukter som vätgas och syrgas är konstanta inom felgränserna, trots att radiolytisk modellering av hela systemet förutser en ökning med tiden. Detsamma gäller halterna uran och fissionsprodukter som strontium och cesium. Modelleringsarbetet fortsätter och nya försök är planerade för att förbättra dataunderlaget och möjliggöra en radiolytisk modellering av bränsleupplösning.

I samarbete med Posiva har försök med 0, 5 och 10 procent urandioxid, som dopats med uran-233, i närvaro av metalliskt järn genomförts med isotoputspädningsmetoden. Metoden möjliggör en analys av data även om uranfällning sker /22-16/. De halter uran som uppmätts i lösningen eller vid analys av järnytorna efter avslutat försök är mycket låga. Uppskattningen av matrisupplösningshastigheten bekräftar tidigare uppmätta låga värden /22-17/. Arbetet fortsätter inom ramen för EU-projekt NF-Pro. En ny studie med samma material och metod, men med lösningar som bara innehåller en ppm sulfid – med eller utan närvaro av metalliskt järn – visar ingen mätbar effekt av vare sig alfadopningsnivå eller försökstid på de uppmätta uranhaltarna.

Försöket med en urandioxidkuts dopade med 10 procent uran-233 /22-14/ upprepades senare i samarbete med ITU utan påverkan av titanpartiklar. Sådana skulle eventuellt ha kunnat påverka resultatet. Återigen uppmättes mycket låga halter uran i lösning. Någon ökning i halterna kunde inte detekteras under det mer än ett år långa försöket. Vid försöksavslutningen öppnades autoklaven i en handskbox fylld med inertgas och kutsen överfördes snabbt till ett vakuumtransportkärl. Undersökning av urandioxidytan med ytspektroskopiska metoder (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) påvisade endast stökiometrisk urandioxid (UO_2), det vill säga ingen oxidation av ytan kunde observeras. Detta resultat överensstämmer med publicerade data av XPS-analyser i experiment med alfaradiolys i vätgasmättade lösningar och urandioxidtytor /22-18/ och visar att mängden oxiderat uran vid ytan minskar med tiden.

Elektrokemiska undersökningar har visat att korrosionspotentialen för urandioxid och Simfuel (urandioxid som innehåller icke-radioaktiva fissionsproduktelement och metallpartiklar liknande de i använt bränsle) sjunker i närvaro av vätgas /22-19/. Under vissa omständigheter närmar sig korrosionspotentialen jämviktspotentialen mellan vätgas och vätejoner. Detta kan tyda på en galvanisk koppling mellan områden där denna elektrokemiska process katalyseras och resten av urandioxidytan. Det är också möjligt att väteradikaler, som bildas genom dissociation av vätgas på metallpartiklar i bränslet eller på ytaktiva UO_{2+x} -områden under gammabestrålning, reducerar oxiderat fem- och sexvärt uran på ytan till fyrvärt uran.

Förståelsen av kinetik och mekanism för reaktioner mellan radiolytiska oxidanter och urandioxid har förbättrats genom de studier som genomförts vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) under perioden. En studie av skillnaden i oxidationsutbyte mellan en-elektronoxidanter och två-elektronoxidanter (som väteperoxid) visade betydligt lägre oxidationsutbyte för en-elektronoxidanter (till exempel IrCl_6^{2-}), eftersom dessa producerar femvärt uran som inte går i lösning /22-20/. Kinetiken för reaktionen mellan urandioxid och väteperoxid (som tillsammans med vätgas är huvudprodukten av alfaradiolys) har studerats som funktion av vätekarbonathalten och hastighetskonstanter samt deras beroende av jonstyrkan har bestämts /22-21/. Reduktion av upplöst sexvärt uran med vätgas har studerats som funktion av temperatur och reaktionshastigheten och aktiveringsenergin har bestämts. Tillsatt urandioxid kunde inte katalysera reaktionen /22-22/. Effekten av bestrålning på reaktivitet av urandioxidens yta har studerats och en marginell ökning av ytans reaktivitet med stråldos har uppmäts /22-23/. Effekten av partikelstorlek på urandioxidoxidation och upplösning via reaktion med permanganatjoner har undersökts genom att använda pulversuspensioner med partiklar av olika storlek. Hastighetskonstanter och aktiveringsenergi bestämdes för varje storleksfraktion och resultaten visade att hastighetskonstanten endast ökade marginellt med minskad partikelstorlek /22-24/. En studie av den relativa betydelsen av olika radiolysprodukter genomfördes genom att jämföra uranhalt i lösning som funktion av bestrålningstid (gammastrålning) med numerisk simulering. Resultaten visar att molekylära oxidanter har störst betydelse för oxidation av urandioxid vid längre bestrålningstider, vilket i hög grad förenklar simuleringen av bränsleupplösning /22-25/. En modell som beskriver den geometriska alfa- och betadosfördelningen utifrån radionuklidinventariet i använt kärnbränsle har utvecklats vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) /22-26/. En modell för strålinducerad upplösning av bränsle när ytkoncentrationen av väteperoxid når nästan konstant nivå på grund av produktion och förbrukning med samma hastighet har också utvecklats. Påverkan av andra reaktioner i lösningen är under utredning /22-27/.

Inom ramen för projektet NF-Pro har en studie av påverkan av upplöst vätgas vid förbrukning av oxidanter producerade från alfaradiolys i homogen lösning genomförts vid Chalmers Tekniska Högskola (CTH). Mätningar av radiolytiskt producerat syre i lösningar med plutoniumisotopen plutonium-238 under 10 bar argon eller vätgas visar att vätgas inte påverkar produktionen av oxidanter i en homogen lösningen, vilket i sin tur bekräftar litteraturdata uppmätta vid lägre vätgashalter /22-28/.

Program

Med hänsyn till ökningen av medelutbränning i framtida bränsle planeras nya lakningar med bränsle som har utbränningar högre än 50 MWd/kgU under olika förhållanden. Syftet är att förbättra SKB:s dataunderlag för att beräkna upplösning av högutbränt bränsle.

Försök med alfadopat material i närvaro av reduktanter vilka förväntas i djupa grundvatten kommer att fortsätta. Arbetet med studier som förbättrar förståelsen av mekanismer för de processer vilka sker under bränsleupplösning ska fortsätta under perioden i samarbete med KTH, ITU och CTH. Aktinidförsök i sonden Chemlab II på Äspölaboratoriet har avslutats och försök med använt bränsle eller alfadopat urandioxid är planerade att starta i samarbete med KTH och CTH under den kommande perioden.

Insatser inom området modellering av bränsleupplösning samt uppskattning av osäkerheter i parametrar och modeller görs också inom ramen för det nyss startade EU-projektet Micado, i samarbete med KTH och Studsvik.

22.2.13 Lösning av gapinventarium

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I säkerhetsanalysen antar man att gapinventariet löser sig omedelbart, eftersom de flesta av de segregerade nukliderna är lösliga och rörliga.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

22.2.14 Speciering av radionuklider, kolloidbildning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Inom SR-Can-projektet gjordes en ny beräkning av radionuklidens löslighet för att få en bättre bedömning av osäkerheter och känsligheter, särskilt med avseende på variationer i sammansättning i grundvattnet och bentonitens porvatten /22-29/.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Under de reducerande förhållanden som förväntas i ett slutförvar är urandioxidmatrisen stabil. Eftersom det finns relativt höga halter upplöst silikat har bildning av en fyrvärd uransilikatfas (koffinit, $USiO_4 \cdot nH_2O$) föreslagits som möjlig under reducerande förhållanden. Koffinit har observerats i uranfyndigheter och befintliga termodynamiska data tyder på att den kan vara stabilare än urandioxid. Experimentella studier genomfördes vid Studsvik i samarbete med CEA i Frankrike för att framställa koffinit under förhållanden som skulle gynna dess bildning. En undersökning av naturliga koffinitmineral visade att de innehöll relativt höga halter oxiderat uran. Analys av alla data visar att en omvandling av urandioxidmatrisen till koffinit under reducerande förhållanden är ganska osannolik även under långa tidsperioder /22-30/.

I scenariot med en skadad kapsel har redoxförhållandena i närområdet en mycket stor betydelse. Ett forskningsprogram för att studera de redoxprocesser som förväntas ske i en skadad kapsel, speciellt deras kinetik, pågår sedan några år på SKB /22-31/.

Studier av mekanismen och kinetiken för reduktion av selen, teknetium och plutonium på järnkorrosionsprodukter inklusive dess karakterisering med XAS (X-Ray Adsorption Spectroscopy) och RIXS (Resonant Inelastic X-ray Scattering) genomfördes inom EU-projekt NF-Pro.

Efter avslutat försök, har ytan av en järnkuts som användes under bränslelakning /22-32/ undersökts med spektroskopiska metoder och reducerade fissionsprodukter samt aktinider karakteriserades /22-33/.

En studie med ytkänsliga spektroskopiska metoder (XPS) har visat att magnetit, som är den huvudsakliga korrosionsprodukten av järn under syrefria förhållanden, reducerar sexvärt uran samtidigt som tvåvärt järn i magnetitstrukturen oxideras till trevärt järn /22-34/.

SKB fortsätter att delta aktivt i OECD-NEA-projektet TDB (Thermodynamic Data Bases) där kvalitetsfrågor angående användning av termodynamiska databaser i säkerhetsanalyser diskuteras kontinuerligt.

Program

En litteraturstudie av samfällning av radium med bariumsulfat ska tas fram för att förbättra underlaget för processen inför SR-Site och möjligtvis kompletteras med experimentellt arbete.

Studier av redoxkinetik för olika oxiderade former av radionuklider (bland annat Se(VI), Tc(VII) Np(V) och Pu(V), Pu(VI)) på färsk och korroderade järnytor kommer att fortsätta i samarbete med Uppsala universitet, Studsvik, KTH, Nagra, ITU och Paul Scherrer Institut.

22.2.15 Heliumproduktion

Alfapartiklar (heliumkärnor) från alfasönderfall i bränslet bildar gasformigt helium.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Inom ramen för det franska projektet Precci har man studerat flera aspekter av utvecklingen av det använda bränslet över långa tider, bland annat konsekvenserna av heliumuppbyggnaden för korngränsernas mekaniska stabilitet. Man konstaterar därvid att vad som händer med det helium som produceras genom alfasönderfall fortfarande är en öppen fråga /22-35/.

Program

Frågan har aktualiserats även för det svenska programmet då utbränningarna på framtida bränsle kommer att bli högre än på det nuvarande inventariet och då även Mox-bränsle kommer att användas i svenska reaktorer. Detta kommer att kräva forskningsinsatser. På grund av de långa tidsperioderna för heliumuppbyggnaden är experimentella undersökningar knappast möjliga och SKB avser att undersöka om man i stället kan använda datorsimuleringar.

23 Kapseln som barriär

SKB:s referenskapsel består av en inre behållare av segjärn och ett yttre hölje av koppar. Insatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön. Den tekniska utvecklingen samt utrustningar och metoder för att tillverka, försluta och prova kapseln beskrivs i del III, kapitel 14.

Kapseln är en viktig barriär mot spridning av radionuklider. I det här kapitlet beskrivs den forskning som SKB genomför i avsikt att pröva kapselns långsiktiga säkerhet.

23.1 Initialtillstånd

Med initialtillstånd för kopparkapseln och segjärnsinsatsen menas tillståndet hos kapseln vid tiden för deponeringen. Tillståndet beskrivs i säkerhetsanalysen med hjälp av en uppsättning variabler.

23.1.1 Variabler

Inga förändringar har skett beträffande variablerna för kopparkapsel och segjärnsinsats. Det är samma uppsättning som redovisades i Fud-program 2004, se tabell 23-1.

23.1.2 Geometri

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI framförde synpunkten att acceptanskriterierna måste grundas på vad en viss defekt innebär för kapselns integritet.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Vid tillverkningen av insatserna kan olika gjutfel uppkomma. Tänkbara fel som kan uppträda är blåsor (till exempel gasinneslutning), sugningar (på grund av otillräcklig materialfyllnad), defekt grafitstruktur (till exempel ”Chunkygrafit”) och inneslutningar (till exempel slagg och oxider).

Sedan Fud-program 2004 har en probabilistisk analys och en skadetålighetsanalys genomförts som ett led i arbetet med att ta fram acceptanskriterier för segjärnsinsatsen. Preliminära resultat från skadetålighetsanalysen visar att insatsen är mycket defekttålig. Skadetålighetsanalysen kommer att granskas samt uppdateras i vissa avseenden.

Preliminära provningsmetoder med ultraljud för segjärnsinsatsen har tagits fram och ska utvecklas vidare.

Tabell 23-1. Variabler för kopparkapsel och segjärnsinsats.

Variabel	Definition
Geometri	Geometriska mått för kapselkomponenterna. Här ingår även beskrivning av eventuella tillverkningsfel vid svetsning och dylikt.
Strålintensitet	Intensiteten av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålningen som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Materialsammansättning	Materialsammansättning hos kapselkomponenterna.

På samma sätt som vid gjutning av segjärn kan inneslutningar eller kaviteter uppträda vid gjutning av koppar. Speciellt i stora koppargöt, som används som utgångsmaterial vid varmformning av kopparrör, har gjutfel kunnat identifieras. De har varit mest uttalade i götets ändar. Dessa ändar kapas bort innan vidare tillverkning sker. Kaviteter som inte är oxiderade i götets inre delar kan fogas samman under extrusionsprocessen. Sådana diskontinuiteter försvinner därmed medan kaviteter med oxiderade ytor formar stråk av oxidpartiklar i det extruderade röret.

Preliminära provningsmetoder med ultraljud för kopparkomponenter har tagits fram och ska utvecklas vidare.

Både oförstörande och förstörande provning har genomförts för att fullständigt utvärdera integriteten hos lock- och bottenhetsarna utförda med friction stir welding (FSW). Oförstörande provning (OFP) har utförts med röntgen och ultraljud före och efter bearbetning. Dessutom har förstörande provning i form av mikroskopstudier och kemisk analys av svetsgodsets sammansättning utförts. Som helhet är svetsgodset mycket homogent. Endast en typ av återkommande diskontinuitet har detekterats med oförstörande provning. En foglinjeböjning uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen ut mot ytan /23-1/. Med nuvarande svetsprocedur kan foglinjeböjningen minimeras till under två millimeter i radiell led.

Program

Skadetålighetsanalysen av segjärnsinsatsen kommer att uppdateras. Arbetet med ultraljudsmätning av kapselkomponenter behandlas i del III, avsnitt 14.3.2 och 14.4.2. Fortsatt arbete kommer att genomföras inom området defekter. Utveckling av tapputformningen för att minimera foglinjeböjningen vid friction stir welding fortsätter.

23.1.3 Strålintensitet

SKB:s kriterium är att ytdosraten på kapseln inte får överstiga 1 Gy/h.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SSI bedömer att det finns en osäkerhet som innebär en risk för att dosraten i vattenkaviteter nära ytan överstiger 1 Gy/h i ett litet område närmast kapseln.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Alara Engineering /23-2/ har gjort nya beräkningar och använt kopplad foton- och elektrontransportteori för att bestämma flödet av elektroner vid kapselytan. Resultaten visade att betydelsen av de lokala förhållandena nära ytan är ganska liten och att dosraten till vatten vid kopparytans utsida bestäms tämligen väl av gammadosraten.

Program

Ytterligare strålskärmsberäkningar kan bli aktuella för att täcka högre utbränningsgrader och även kommande Mox-bränsle.

23.1.4 Temperatur

Här avses kapselns initiala temperatur, det vill säga temperaturen omedelbart efter deponering. Denna variabel ingår formellt i initialtillståndet, men föranleder inga forskningsinsatser. Kapselns temperaturutveckling uppskattas i en integrerad temperaturmodellering av förvarets närområde.

23.1.5 Mekaniska spänningar

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration för kapslar förslutna med elektronstrålesvetsning. Storleken på och betydelsen av eventuella restspänningar i förslutningssvetsar utförda med friction stir welding bör utredas under perioden.

SKI påpekade att eventuell förekomst av restspänningar i förslutningssvetsar utförda med friction stir welding bör utredas.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Restspänningsmätningar har utförts på en locksvets utförd med friction stir welding /23-3 och 23-4/. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 39 MPa, det vill säga väl under sträckgränsen för svetsgodset.

Program

Arbete med att bestämma restspänningarna i förslutningssvetsar utförda med friction stir welding kommer att fortsätta under den kommande programperioden.

23.1.6 Materialsammansättning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

SKI påpekade att det återstår att visa om och i så fall hur FSW-svetsarnas egenskaper skiljer sig från grundmaterialets, samt hur eventuella föroreningar i svetsen inverkar.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Kemiska analyser av svetsgodset har utförts på flera locksvetsar /23-5/. Man upptäckte nickelpartiklar från verktygstappen och kopparoxidpartiklar. Mängden nickel i svetsen motsvarade upp till 20 ppm och oxidmängderna motsvarade 25 ppm. Pågående aktiviteter visar att oxidmängderna kan minskas genom att svetsningen sker under skyddsgas.

Program

Konsekvenserna av främmande material i FSW-svetsen kommer att utredas ytterligare under den kommande Fud-perioden. Samtidigt kommer utvecklingsarbete att pågå för att minska riskerna för att främmande material kommer in i koppargodset i fogen.

23.2 Kapselprocesser

23.2.1 Översikt av processer

Genom stråldämpning i kapselmaterialen omvandlas en del av strålningen som tränger ut till kapseln till värmeenergi. Värmetransporten sker genom ledning inom insatsen och kapseln, samt till stor del genom strålning mellan dessa två delar.

Insatsen och kapseln kan deformeras mekaniskt av yttre laster. Dessutom förekommer termisk expansion, som bland annat leder till att hålrummet mellan insats och kapsel förändras.

En viktig kemisk process är utvändigt kopparkorrosion, men även spänningskorrosion skulle kunna förekomma i såväl kopparkapsel som segjärnsinsats. Materialen kan förändras av strålpåverkan. Om vatten tränger in sker korrosion av segjärnsinsatsen med åtföljande vätgasbildning och galvanisk korrosion.

Radionuklidtransport i kapselns hålrum berörs i avsnitt 22.2.8. Transport av radionuklider i närområdet behandlas i avsnitt 25.3.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i kapseln.

23.2.2 Stråldämpning/värmealstring

De fysikaliska förlopp som här avses (radioaktivt sönderfall och absorption av strålning) är väl kända och tillgången på data är tillräcklig för säkerhetsanalysen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Inget forskningsprogram presenterades i Fud-program 2004.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har framkommit.

Program

Området bedöms inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

23.2.3 Värmetransport

Ingen ny kunskap har framkommit. Processen behandlas som i Fud-program 2004, det vill säga i samband med bränslets temperaturutveckling.

23.2.4 Deformation gjutjärnsinsats

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Under 2003 startades ett stort program för probabilistisk analys av kapselhållfasthet. Inom detta program skulle vi ta fram materialdata från tillverkade kapslar. Tryckprovning av kapselsektioner skulle också ingå i programmet.

SSI påpekade att det behöver styrkas att de avkortade kapslar med fastskruvat lock som trycktestats inte har några fördelar i hållfasthet jämfört med kapslar i full skala med fastsvetsade lock.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Provkroppar för materialkaraktisering togs ut ur tre fullskaliga kapselinsatser efter en statistisk testplan. Tre olika typer av provkroppar användes för att bestämma den statistiska fördelningen av olika materialparametrar och defekter: böjprovkroppar för att bestämma brottseghet, provstavar för dragprovning och provkroppar för kompressionstestning.

Dessa data, tillsammans med resultat från finit elementanalys av spänning-töjningstillståndet i kapselinsatsen, användes sedan i en probabilistisk analys för att bestämma sannolikheten för plastisk kollaps orsakad av höga yttre tryck eller brott på grund av spricktillväxt i områden med dragspänningar /23-6/.

De viktigaste slutsatserna från den probabilistiska analysen var /23-7/:

- Vid ett övertryck på 44 MPa var sannolikheten för brott obetydlig (cirka $2 \cdot 10^{-9}$) även när flera pessimistiska antaganden gjorts.
- Spänningarna i kapselinsatsen är vid yttre övertryck huvudsakligen kompressiva. Områdena med dragspänningar har mycket liten volym.
- Analysen för plastisk kollaps beaktar endast den första lokala kollapshändelsen. En total kollaps av kapselinsatsen kommer att inträffa vid betydligt högre tryck.

Två storskaliga trycktester har genomförts med korta (1 050 millimeter) kapselsegment med full diameter /23-8/. I båda fallen förblev kapseln obruten upp till 130 MPa. Den andra kapseln belastades till plastisk kollaps. Denna inträffade vid 139 MPa. I samband med testerna genomfördes beräkningar som visade att avkortade kapslar inte ger några fördelar från hållfasthetssynpunkt.

Inverkan av jordbävningsinducerade 10 respektive 20 centimeter långa bergskjuvningar, med skjuvhastigheten 1 meter per sekund, längs en spricka genom ett deponeringshål i ett KBS-3V-förvar har undersökts för ett antal olika skjuvfall och för olika egenskaper hos buffertmaterialet /23-9/. Scenarierna var modellerade med finita elementmetoden. Beräkningarna gjordes med koden Abaqus. En 3D-elementmodell användes för att modellera berg, buffert och kapsel. Kontaktelement, som kan simulera separation, användes till kontaktytorna mellan buffert och berg och mellan buffert och kapsel.

Inverkan av i huvudsak följande faktorer har undersökts:

- Lutningen hos den korsande sprickan.
- Skjuvriktningen när sprickan inte är horisontell (lutningen avviker från 90°).
- Skjuvplanets läge när lutningen är 90°.
- Skjuvlängden.
- Bentonitsort.
- Bentonitdensitet.
- Omvandling av bufferten till illit eller cementerad bentonit.

Plastiska töjningar större än 1 procent uppkom i kopparn redan efter 10 centimeters skjuvning i alla fallen med natrium- och kalciumbentonit. Men för ett flertal skjuvningar i natriumbentonit och en skjuvning i kalciumbentonit uppstod sådana plasticeringar endast i locket.

De plastiska töjningarna i segjärnet blev i regel mindre än i kopparn, i huvudsak beroende på att flytspänningen är högre i segjärnet. För alla fallen med natriumbentonit utom ett och för ungefär hälften av fallen med kalciumbentonit, var de plastiska töjningarna i stålet mindre än 1 procent efter 10 centimeters skjuvning. De plastiska töjningarna tycks öka med ökande skjuvrörelse, fastän inflytandet av skjuvrörelsen minskar ju mjukare buffertmaterialet är. De maximala plastiska töjningarna i kopparröret och segjärnsinsatsen blev för alla fallen större med kalciumbentonit än med natriumbentonit.

Omvandling till illit medför att påverkan av en bergskjuvning på kapseln är obetydlig i jämförelse med när ingen omvandling skett, eftersom styvheten och skjuvhållfastheten hos illitisk lera bara är en tiondel av motsvarande egenskaper hos MX-80. Detta beror i sin tur på att illiten förlorat nästan hela svälltrycket.

Cementerad bentonit med tjockleken 8,75 centimeter runt kapseln medför att påverkan av en bergskjuvning blir allvarligare än för den ursprungliga opåverkade bentoniten, eftersom cementeringen ökar styvheten hos bufferten. Egenskaperna hos cementerad bentonit är emellertid inte kända. Den utförda beräkningen bör därför ses som ett exempel snarare än en förutsägelse.

Beräkningarna är förknippade med ett flertal osäkerheter som bör beaktas när konsekvenserna av en bergskjuvning analyseras.

Krypmodeller för kopparrör har implementerats i Abaqus för att användas vid simulering av bergskjuvning över ett deponeringshål /23-10/.

Program

Arbete pågår med deterministiska analyser av total kollaps hos intakta kapselinsatser och insatser med gjutdefekter och andra defekter, som kan minska kapselinsatsens hållfasthet. Resultaten kommer sedan också att ligga till grund för acceptanskriterier för oförstörande provning av kapselinsatser.

Vi avser också att komplettera arbetet med analyser av kapselhållfasthet för skjuvrörelse med probabilistiska analyser. Arbeta med att införa krypmodeller kommer också att fortsätta. Vi kommer att göra de försök som behövs för att verifiera modellerna.

23.2.5 Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck

Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck har behandlats integrerat med gjutjärnsinsatsen i 23.2.4. Därför diskuterar vi här huvudsakligen forskningen om koppars krypegenskaper.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Programmet för krypprovning skulle fortsätta under treårsperioden.

Kasam påpekade att fortsatta studier av krypning av kopparmaterialet och speciellt då kopparförbanden var angelägna.

SKI:s synpunkt var att det behövdes en samlad redovisning av experiment och modellering av krypning i koppar och hur dessa resultat ska användas i säkerhetsanalysen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Provkroppar från locksvetsar gjorda med FSW och elektronstrålesvetsning har krypprovats i temperaturintervallet 75 till 175 °C /23-11/. Resultaten från undersökningarna av FSW-svetsarna visar att materialet i fogen har likartad krypduktilitet och kryplivslängd som grundmaterialet. Duktiliteten vid brott var mer än 40 procent.

Mekanismerna bakom fosfors påverkan på krypduktiliteten hos syrefri koppar har ägnats stor uppmärksamhet under perioden /23-12 och 23-13/. Omkring år 1990 upptäcktes att ren koppar (Cu-OF) har extra låg krypduktilitet i temperaturintervallet 180 till 240 °C. Om man tillsätter 50 ppm fosfor (Cu-OFP) försvinner den låga duktiliteten. Tidigare har detta förklarats med att svavel kan ha lett till försprödning av materialet genom bildning av kaviteter kring sulfidineslutningar /23-14/. Metallografin av kaviteterna i Cu-OF och i viss utsträckning också i Cu-OFP har nu omvärderats. Utifrån detta har sedan kärnbildning och tillväxt av krypkaviteter modellerats. I modellen antar man att kaviteterna uppstår när oregelbundenheter på ömse sidor av en korngräns möts under korngränsglidning. Kavitetstillväxten kan vara diffusionsstyrd eller töjningsstyrd. Båda processerna finns med i modelleringen och i det aktuella temperaturområdet visar det sig att diffusionen dominerar. Fosforanrikningar vid korngränserna i Cu-OFP blockerar korngränsglidningen /23-12/.

I Cu-OFP är fosfor tillsatt för att öka krypduktiliteten, men den ger också en kraftigt förhöjd kryphållfasthet. Orsaken till detta är att för dislokationer som rör sig långsamt ger växelverkansenergin mellan fosforatomerna och dislokationerna upphov till en agglomerering och en blockering av dislokationerna /23-13/.

En krypmodell för temperaturer under 100 °C och de belastningar kopparen kommer att utsättas för i slutförvaret har utvecklats /23-15/.

Program

Även under kommande period kommer undersökningarna av koppars krypegenskaper att fortsätta. SKB kommer även att fortsätta att analysera kapselhållfasthet vid skjuvrörelser och göra de försök som behövs för att verifiera våra modeller.

Beräkningar har visat att ojämn svällning av bentoniten kan leda till lokala dragspänningar på upp till 59 MPa i kopparhöljet, se avsnitt A1.4.2 i bilaga A, det vill säga till en lokal plasticering av kopparhöljet. En studie av effekterna av kallbearbetning på koppars krypegenskaper har därför påbörjats. Studien kommer att fortsätta under 2008.

23.2.6 Termisk expansion

Skillnaden i längdutvidgningskoefficient mellan gjutjärn och koppar kan leda till töjningar i koppar-kapseln. Dessa är dock försumbara från hållfasthetssynpunkt.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Inga direkta synpunkter framfördes vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit sedan Fud-program 2004.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

23.2.7 Deformation från inre korrosionsprodukter

Uppbyggnaden av korrosionsprodukter mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet kan leda till ett inre tryck på kopparhöljet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

De pågående experimenten kommer att avslutas under perioden. Studier av analogier skulle fortsätta under perioden under förutsättning att det fanns bra studieobjekt.

SKI påpekade att det inte framgick av Fud-program 2004 hur SKB tänkte ta hand om de experimentella resultaten, att tryckuppbyggnad från korrosionsprodukter inte äger rum i den tidigare antagna omfattningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

De experimentella studierna om konsekvenserna av uppbyggnaden av korrosionsprodukter i spalten mellan kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen har pågått sedan SR 97 och har nu avslutats under perioden /23-16/. I inget av experimenten lyckades man påvisa någon tryckuppbyggnad till följd av uppbyggnaden av korrosionsprodukter. Slutsatsen från undersökningen var att om vatten tränger in i spalten mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet kommer korrosionsprodukter att deformeras och sprida sig över gjutjärnsytan, snarare än expandera och trycka ut kopparhöljet från insatsen. Så småningom kan spalten komma att fyllas med korrosionsprodukter som gradvis kompakteras. Hur korrosionen sedan fortgår beror på om vatten kan tränga in i korrosionsprodukterna och nå järnytan. I de avslutade experimenten begränsades inte korrosionsprodukternas utbredning på ett effektivt sätt. Till fortsatta studier kommer SKB därför att använda miniatyrkapslar med defekta kopparhöljen.

Avsaknaden av expansion orsakad av anaerob korrosion i spalter stöds också av arkeologiska analogier. Arkeologiska koppar-järn-artefakter som korroderat i hundratals år visade inte några belägg för expanderande korrosionsprodukter /23-17/.

Program

Installationen av miniatyrkapslar (Minicanprojektet) i Äspölaboratoriet är färdig och kapslarna övervakas kontinuerligt. Det är inte beslutat hur länge försöken ska pågå, men någon av kapslarna kommer troligen att undersökas mot slutet av perioden.

23.2.8 Korrosion gjutjärnsinsats

Om det finns en genomgående skada i kopparhöljet kan vatten nå in till gapet mellan kapselinsats och kopparhölje och vidare in i insatsen, för att där leda till anaerob korrosion.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

En undersökning av korrosion av järn i kontakt med bentonit pågick. De första resultaten visade en något högre korrosionshastighet än vad som uppmätts utan närvaro av bentonit. Det var inte klart vad orsaken till detta var och undersökningen av korrosion av järn i kontakt med bentonit skulle fortsätta under perioden.

De pågående undersökningarna av anaerob korrosion av järn i gammastrålfält skulle avslutas under perioden.

SKI påpekade att det inte var klarlagt vilken roll en kapsel med genomgående hål ges i säkerhetsanalysen och att det därför var svårt att bedöma om SKB gör tillräckligt på området järnkorrosion.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har studerat inverkan av bentonit på järnkorrosion inom ett EU-projekt (NF-Pro) och även i samarbete med Posiva. Arbetet har relevans både för vertikal (KBS-3V) och horisontell (KBS-3H) deponering enligt KBS-3-metoden. I fallet KBS-3V kan gjutjärnet komma i kontakt med bentonitbufferten om kopparhöljet genombrutits. I fallet KBS-3H ligger paketet med kapsel och bentonit inuti en perforerad stålbehållare som kommer att korrodera bort. Inverkan av korrosionsprodukterna på bentoniten är därför intressant att studera. Läget i projekten är rapporterade i /23-18 och 23-19/.

Korrosionsprodukterna som bildas i bentonit har inte lika stor volym som de som bildas utan närvaro av bentonit, även om korrosionshastigheten var något högre i närvaro av bentonit. Ramanspektroskopi visade att korrosionsprodukterna bestod av en inhomogen blandning av magnetit, hematit och götit där magnetit var dominerande species. I bentoniten minskade järnhalten med ökande avstånd från gränssytan mellan bentonit och järn, med lokala halter på upp till 20 procent. Det totala järninnehållet i bentoniten ökade med flera procentenheter under experimentet och katjonbyteskapaciteten var reducerad medan den hydrauliska konduktiviteten ökade avsevärt.

Inverkan av gammastrålning på järnkorrosionen behandlas i avsnitt 22.2.10.

Program

De experimentella studierna av järnkorrosion i bentonit och växelverkan mellan bentonit och järn kommer att fortsätta under perioden. De kommer också att kompletteras med geokemisk modellering. Det är ännu inte helt klarlagt i vilken form järninnehållet finns i bentoniten.

23.2.9 Galvanisk korrosion

Metallisk kontakt mellan gjutjärn och koppar ger förutsättningar för galvanisk korrosion.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet skulle bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkom.

Inga direkta synpunkter framfördes vid granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I Fud-program 2004 rapporterades resultaten från en experimentell undersökning av eventuella effekter på korrosionshastigheten på grund av metallisk koppling mellan koppar och gjutjärn. Projektet slutrapporterades under 2005 /23-20/. Resultaten visade att även om man under syresatta förhållanden kunde mäta korrosionshastigheter på upp till 100 mikrometer per år var den minst en

faktor 100 lägre under syrefattiga förhållanden. Experimenten utfördes i en handsbox i en atmosfär med 1–2 ppm syre. Typiska korrosionshastigheter var mindre än 0,1 mikrometer per år vid 30 °C och mindre än 1 mikrometer per år vid 50 °C. Detta är korrosionshastigheter jämförbara med vad som mätts utan galvanisk koppling mellan järn och koppar.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

23.2.10 Spänningskorrosion gjutjärnsinsats

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Beräkningar har visat att kapselinsatsen endast har mycket små områden med dragspänningar /23-7/. Risken för att spänningskorrosion skulle leda till kapselbrott kan därför uteslutas.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

23.2.11 Strålpåverkan

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

Inga direkta synpunkter framfördes vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Inför Fud-program 2001 lät SKB /23-21/ göra beräkningar av stråldosen på gjutjärnsinsats och kopparhölje och vilka konsekvenser detta skulle kunna få för kapselns mekaniska egenskaper. SKB drog slutsatsen att riskerna är försumbara och att påverkan under 100 000 år inte ens skulle vara mätbar.

Nya beräkningar, som gjorts av CEA /23-22 och 23-23/ visar att strålningsinducerade utskiljningar av koppar som finns som förorening i stål ger upphov till en påtaglig förspridning av låglegerat stål som används till förvaringskapslar för använt PWR-bränsle.

Program

Konsekvenserna av strålningspåverkan på kapselinsatsen måste utredas ytterligare under de närmaste åren.

23.2.12 Korrosion kopparkapsel

Under nu kända förhållanden på förvaringsdjup beräknas kapseln förbli intakt under mycket lång tid.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB:s program omfattade undersökningar av förutsättningarna för mikrobiell korrosion, korngränskorrosion i svetsar, inverkan av ytfilmer på korrosionsförloppet och mekanismerna och kinetiken för korrosion i syrefria sulfidmiljöer.

SKI välkomnade SKB:s fortsatta studier av kopparkorrosion och påpekade att det saknades en redogörelse för oxidskiktets betydelse för korrosion av koppar, särskilt i klorid- och sulfidhaltiga vatten, samt för mikrobers möjligheter att överleva i bufferten och möjligheten av biofilm på kapselytan och den eventuella betydelsen av detta. SKI ansåg också att det vore önskvärt att SKB uppdaterade sin sammanställning om kopparkorrosion.

SSI påpekade att det behövde styrkas att en svets gjord med friction stir welding har samma korrosionsegenskaper som materialet i övrigt. Kasam framförde samma synpunkt och menade också att det krävdes fortsatta studier av korrosion som styrs av växelverkan med bentonit.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Korngränsskorrosion av svetsfogarna har studerats experimentellt i en miljö där detta skulle kunna äga rum. Kopparprover togs från svetsar på verkliga kapslar och exponerades för ammoniumhydroxid i 14 dagar vid 10 bars tryck och 80 °C /23-24/. Man drog slutsatsen att det var mycket osannolikt att korngränsskorrosion i kopparsvetsarna skulle ha någon skadlig inverkan på kapslarna under förvaringsförhållanden.

Mekanismerna och kinetiken för kopparkorrosion i anaeroba kloridlösningar som innehåller sulfid (10^{-3} mol/l) har studerats elektrokemiskt under naturliga korrosionsförhållanden /23-25/. Under dessa förhållanden är inte koppar termodynamiskt stabilt och anodisk tillväxt sker av en kalkocit-digenitfilm genom katodisk reduktion av vatten. Initialt växer filmen snabbt genom jontransport (eller motsvarande defekttransport). Om filmen förblir koherent stannar filmtillväxten av och korrosionen blir extremt långsam. Om spänningar i gränssytan och filmen bryts fortsätter filmtillväxten och en mycket tjockare nodulär korrosionsprodukt bildas. Målet för studien är att utveckla en korrosionsmodell som skulle kunna användas i säkerhetsanalysen.

Smith et al. /23-26/ har studerat omvandlingen av en Cu_2O -film på koppar till Cu_2S i en sulfidhaltig vattenlösning med en kombination av elektrokemiska metoder och in situ Ramanspektroskopi. Omvandlingen till sulfid verkar äga rum vid gränsen mellan oxid- och vätskeytan snarare än genom galvanisk koppling av kopparoxidation till Cu_2S och Cu_2O -reduktion till Cu.

Bildning av kopparsulfid på kopparytor i bentonit med olika svälltryck har studerats under naturliga förhållanden och tryck på förvaringsdjup i modellsystem /23-27/. Mängden bildad kopparsulfid minskade linjärt med ökande densitet. Resultaten från dessa försök stöder således den gällande modellen där mikrobiell aktivitet inte är möjlig vid full densitet. Nya uppföljande försök pågår där gränsvärden på densitet för mikrobiell aktivitet i bentonit ska fastställas för att kunna användas i säkerhetsanalysen. Kvantitativa data på sulfidbildning och diffusion tas också fram, så att säkerhetsanalyserna kan inkludera mikrobiell aktivitet i stället för att som tidigare utesluta mikrobiell sulfidbildning baserat på miljöfaktorer.

Undersökningar av mikrobeförekomst fortsätter vid kommande brytningar av försök i Lot-serien i Äspölaboratoriet.

Utöver dessa undersökningar pågår ett projekt som syftar till att belysa egenskaperna hos kopparoxidfilmer. Projektet använder ytkänsliga spektrometriska metoder för att karakterisera sorberade och kemiskt bundna karbonat- och kloridspecies till rena kopparytor och kopparytor med olika ytfilmer.

En uppdatering av SKB:s och Posivas gemensamma sammanställning om kopparkorrosion pågår i Posivas regi.

Program

Ytterligare undersökningar av korngränsskorrosion på koppar bedöms inte nödvändiga. Arbete inom de övriga projekten som beskrivits ovan kommer att fortsätta under perioden.

23.2.13 Spänningskorrosion kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

En studie av spänningskorrosion i acetathaltiga vatten skulle genomföras i samarbete med Posiva. Dessutom skulle förutsättningarna för att studera spänningskorrosion med mätningar av akustisk emission från spricktillväxt undersökas.

SKI framhöll att underlaget för att bedöma spänningskorrosion inte är fullständigt. Man påpekade också att spänningskorrosion inte kan omedelbart uteslutas med hänvisning till att kapseln är utsatt för yttre tryck. Dragspänningar, potential och vattenmiljö måste bedömas i tid och rum, om spänningskorrosion ska kunna uteslutas.

Kasam ansåg att SKB borde göra accelererade långtidsförsök för att undersöka riskerna för spänningskorrosion.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Undersökningen av spänningskorrosion i acetathaltiga vatten har avslutats /23-28/. Kopparkapsel och svetsar i kopparkapsel undersöktes för acetathalter från 1 milligram per liter till 100 milligram per liter vid temperatur 100 °C och vid 14 MPa tryck med långsam töjningsteknik. Töjningen till brott vid provningen var jämförbar med töjningen till brott i luft. Fraktografin visade duktilt brott. Detta gällde båda grundmaterial och svetsgods. Någon känslighet för spänningskorrosion kunde alltså inte påvisas i den aktuella miljön.

Studien av spricktillväxt med hjälp av ultraljudemission har också avslutats /23-29/. Testerna, som genomfördes i 0,1 M NaNO₂, visade att sprickningen hade två kinetiska steg med en initiering och tillväxt av mikrosprickor vid lägre spänningsintensitet ($K_I = 10,5 \pm 0,6 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, $J_I = 114,6 \pm 11,7 \text{ kJ/m}^2$) för att sedan övergå i makrosprickning vid högre spänningsintensitet ($K_I = 29,3 \pm 1,2 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$, $J_I = 578 \pm 8,1 \text{ kJ/m}^2$).

Program

Förutsättningarna för sprickbildning på grund av spänningskorrosion kommer att utredas ytterligare under perioden.

23.2.14 Korntillväxt kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

Inga direkta synpunkter framfördes vid granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap har tillkommit sedan Fud-program 2004.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

23.2.15 Radionuklidtransport

Se vidare avsnitt 25.3 som behandlar transport av radionuklider i närområdet.

23.2.16 Integrerade studier – skadad kapsels utveckling

Behandlas i avsnitt 23.2.7.

24 Buffert

Buffertens huvuduppgift är att hindra strömmande vatten från berget att komma i kontakt med kapseln och det använda bränslet. För att klara denna uppgift måste följande krav vara uppfyllda:

- Den hydrauliska konduktiviteten måste vara så låg att en eventuell transport av korroderanter och radionuklider enbart sker genom diffusion.
- Bufferten måste bibehålla sina dimensioner.
- Bufferten måste ha förmåga att självläka, det vill säga inga bestående sprickor får bildas.
- Buffertens egenskaper måste vara fysikaliskt och kemiskt stabila i ett långt tidsperspektiv.

För att bidra till en gynnsam miljö för kapseln är det också ett krav att bufferten förhindrar mikrobiell verksamhet på och i närheten av kapsels yta.

Bufferten får inte heller ha några egenskaper som kan inverka negativt på de andra barriärerna. För att uppfylla detta ska följande gälla:

- Gasgenomsläppligheten ska vara tillräcklig för att stora mängder gas, som eventuellt bildas i en skadad kapsel, ska kunna passera. Gasgenomgången får inte leda till kvarstående genomsläppliga kanaler eller hålrum i bufferten.
- Svälltrycket ska vara tillräckligt högt för att ge god kontakt med det omgivande berget och med kapseln, men inte högre än vad kapseln och berget kan utstå.
- Deformerbarheten ska inte vara större än att kapslarnas läge bibehålls, men heller inte mindre än att bergörelser kan tas upp utan att kapslarna skadas.
- Värmeledningsegenskaperna ska vara sådana att värmen från kapslarna inte leder till oacceptabla fysikaliska och kemiska förändringar av bufferten.
- Bufferten ska inte innehålla något som påverkar de andra barriärernas funktion negativt.

Bufferten bör också ha en förmåga att filtrera kolloidala partiklar.

SKB har tidigare valt en naturlig natriumbentonit av Wyoming-typ som referensmaterial för bufferten. MX-80 är en produktbeteckning på en blandning av olika avlagringar av naturlig lera från Wyoming eller South Dakota i USA. Beteckningen MX-80 specificerar en viss kvalitet och kornstorlek av den torkade och malda bentoniten. I och med Fud-program 2004 frångick SKB MX-80 som referensmaterial, eftersom de senaste årens studier av alternativa buffertmaterial har visat att det finns ett flertal natrium- och kalciumbentoniter på marknaden som mycket väl kan fylla SKB:s krav, se vidare avsnitt 24.1.2.

Baserat på genomförda undersökningar har SKB dragit slutsatsen att en bentonitbuffert efter vattenmättnad bör ha en densitet av 1 950–2 050 kg/m³.

Det valda materialet har följande egenskaper som relaterar till kraven ovan:

Hydraulisk konduktivitet och jondiffusion

Buffertens huvuduppgift är att garantera att diffusion är den dominerande transportmekanismen runt kapslarna. Med en bentonitbuffert med en densitet på 2 000 kg/m³ i vattenmättat tillstånd är transportkapaciteten för advektion minst 10 000 gånger lägre än den för diffusion.

Bentonit begränsar utsläppet av radionuklider från en defekt kapsel. Effekten är dock beroende av den individuella nuklidens egenskaper (diffusivitet, sorptionskoefficient och halveringstid) samt närområdets geometri (defekten i kapseln, transportvägar in i berget).

Svällegenskaper

Bufferten måste kunna svälla för att fylla utrymmet mellan kapsel och berg och för att täta öppningar som kan orsakas av termiska och tektoniska effekter. Erforderlig expansionsförmåga hos bufferten uppskattas motsvara ett minsta svälltryck på cirka 1 MPa, vilket förutsätter en densitet av minst 1 900 kg/m³ för MX-80 i vattenmättat tillstånd vid upp till 10 procents salthalt.

Långtidstabilitet

Kommersiella bentoniter är naturliga material som ofta har bildats för tiotals miljoner år sedan. Detta innebär inte automatiskt att bentonit är stabil i förvarsmiljö. De undersökningar av bentonits långtidsegenskaper som gjorts inom och utom SKB:s program visar dock att kompakterad bentonit kan bibehålla sina gynnsamma egenskaper under långa tider och under en rad olika kemiska och termiska förhållanden.

Mikrobiella egenskaper

Bakterietillväxt har visat sig kunna ske i MX-80-buffert med en densitet av upp till 1 700 kg/m³ vid vattenmättnad, medan 1 900 kg/m³ inte medger någon möjlighet till överlevnad eller reproduktion av bakterier av de slag som undersökts i SKB:s forskning. Det innebär att den sistnämnda densiteten kan ses som den lägsta lämpliga.

Gaskonduktivitet

De försök som har genomförts i SKB:s regi indikerar att MX-80-bentonit kan öppna sig och släppa ut stora mängder vätgas, vilken kan bildas vid korrosion av järminsatsen i en defekt kapsel. Därmed kan oacceptabla tryck i kapseln och mot bufferten undvikas.

Deformationsegenskaper

De viktigaste deformationerna hos bufferten är expansionen uppåt genom förskjutning av tunnelåterfyllningen och skjuvning till följd av förskjutningar i berget. Den uppåtriktade expansionen kan lyfta tunnelgolvet med sprickvidgning och kraftigt ökad hydraulisk konduktivitet som följd.

Förskjutningar i berget kan ske i form av tektoniskt eller termiskt betingad skjuvning av sprickor som skär deponeringshålen. Praktiska försök med MX-80 med en densitet på upp till cirka 2 050 kg/m³ och tillämpning av en halvempirisk reologisk modell har visat att förutsedda berg-rörelser inte åstadkommer buffertdeformationer som ger upphov till kapselskador.

Termiska egenskaper

Buffertens förmåga att överföra värme från kapslar till berg har betydelse främst genom att en alltför låg värmekonduktivitet ger upphov till hög bufferttemperatur. Det medför ändrade lösligheter hos buffertmineralen och ett ångtryck som kan leda till att vattenånga tränger ut från bufferten genom ovanpåliggande tunnelåterfyllning.

Funktionsindikatorer

För att utvärdera buffertens funktion i säkerhetsanalysen har ett antal så kallade funktionsindikatorer och kriterier för dessa som bufferten ska uppfylla definierats. Dessa kriterier finns sammanfattade i tabell 24-1.

Tillverkning av buffertblock beskrivs i del III, avsnitt 13.3.1. I det följande tas tillverkningsfrågor upp endast i den mån de har betydelse för redovisningen av forskningsprogrammet för den långsiktiga funktionen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att SKB har ett bra program för buffertfrågorna, att redovisningen i programmet är föredömligt tydlig och att betydande framsteg har uppnåtts under senare år för modellstudier, utveckling av koder och experiment.

Tabell 24-1. Funktionsindikatorer för bufferten.

Funktionsindikator	Kriterium	Bakgrund
Hydraulisk konduktivitet	$k^{Buffer} > 10^{-12}$ m/s	Begränsa masstransporten till en diffusionsdominerad process.
Svälltryck	$P_{sväll} > 1$ MPa	Säkerställa tätning, självläkande förmåga.
Maximal temperatur	$T^{Buffer} < 100$ °C	Säkerställa att bufferten behåller sina egenskaper under långa tider.
Minimal temperatur	$T^{Buffer} > -5$ °C	Förhindra frysning.
Svälltryck mot kapseln	$P_{sväll} > 0,2$ MPa	Förhindra att kapseln sjunker.
Svälltryck runt kapseln	$P_{sväll} > 2$ MPa	Förhindra mikrobiell aktivitet.
Densitet runt kapseln	$\rho_{Bulk} > 1\ 650$ kg/m ³	Förhindra transport av partiklar genom bufferten.
Densitet runt kapseln	$\rho_{Bulk} < 2\ 100$ kg/m ³	Begränsa skjuvspänningar på kapseln vid berg rörelser.

SKI påpekade att SKB behöver förtydliga och konkretisera kravspecifikationen för bufferten inför framtida ansökningar. SKB ska se till att det finns underlag som motiverar krav och tillhörande kriterier för buffertens funktion. Krav som måste visas vara uppfyllda under förvarsperioden bör kunna utskiljas från krav som är mera att betrakta som ideala förutsättningar för bufferten.

24.1 Buffertens initialtillstånd

24.1.1 Variabler

Initialtillståndet för bufferten, det vill säga värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering, beskrivs i rapporten om initialtillstånd som hör till SR-Can /24-1/. I det följande avsnittet beskrivs forskningsprogrammet för initialtillståndet för de olika variablerna i bufferten (samma variabler används också för återfyllningen).

I SR-Can och den tillhörande processrapporten för buffert och återfyllning /24-2/ beskrivs bufferten med hjälp av en uppsättning variabler, se tabell 24-2.

Tabell 24-2. Variabler för bufferten och återfyllningen.

Variabel	Definition
Geometri	Geometriska mått för buffert och återfyllning. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären.
Porgeometri	Porgeometri som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. Ofta anges porositet, det vill säga den andel av volymen som inte upptas av fast material.
Strålintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Vattenhalt	Vattenhalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Gashalter	Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Lastsituation	Tryck som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Bentonitsammansättning	Den kemiska sammansättningen av bentoniten (plus eventuella radionuklider) i tid och rum i bufferten. Detta inkluderar också föroreningar och andra mineral än montmorillonit.
Montmorillonitsammansättning	Montmorillonitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till montmorillonitytan ingår i denna variabel.
Porvattensammansättning	Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning.
Konstruktionsmaterial	Sammansättning av konstruktionsmaterial i deponeringshålen. Detta inkluderar bottenplattan av cement.

24.1.2 Geometri

Buffertens geometri bestäms av dimensionerna på kapseln och den tjocklek på buffertmaterialet som krävs för att få önskad funktion. De tidigare angivna måtten med 35 centimeter på kapselns sidor, 50 centimeter under kapseln och 150 centimeter ovanför kapseln gäller fortfarande för KBS-3V. Dimensionerna planeras bli något annorlunda för KBS-3H.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB avsåg att fortsätta pröva andra tänkbara buffertmaterial bland bentonitlerorna för att göra det möjligt att optimera upphandlingen med avseende på säkerhet, tillgänglighet och kostnad.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Ett omfattande program för att studera alternativa buffertmaterial har genomförts /24-3/. Huvudsyftet har varit att korrelera fysikaliska och kemiska egenskaper till grundläggande mineralogiska egenskaper. Projektet omfattar följande materialtyper:

- Produkter med liknande halt av montmorillonit och motjonsfördelning som MX-80, eftersom dessa material kan antas ha likvärdiga tätningsegenskaper.
- Material med hög halt av montmorillonit och som domineras av tvåvärda joner. Buffertens höga densitet innebär teoretiskt att sådana material har tillräcklig svällbarhet. Tvåvärda motjoner (till exempel kalcium) förväntas dessutom innebära fördelar vid bland annat låg jonstyrka i grundvattnet.
- Material som innehåller andra svällande mineral.
- Material som innehåller lägre halt av svällande mineral, huvudsakligen för eventuell användning som tunnelåterfyllnad.

Ett flertal kommersiella bentoniter från stora producenter har undersökts, MX-80 från Wyoming (American Colloid), fyra prov från Indien (Ashapura), samt ett prov från Grekland (Silver & Baryte). Vidare har sex prov med lägre kvalitet från Danmark (NCC) och Tjeckien (Universitetet i Prag) undersökts. Samtliga prov har analyserats med avseende på svällnings- och mineralogiska egenskaper.

Entydiga övergripande resultat är att material med hög montmorillonithalt, likartad laddningsfördelning och natrium som motjon uppvisar försumbara skillnader i fysikaliska egenskaper – oberoende av brytplats. Kalcium som motjon innebär minskad svällningspotential, men likvärdiga egenskaper vid samma buffertdensitet. Från svällningssynpunkt är flera av de undersökta bentoniterna lämpliga som buffertmaterial, utan att buffertens dimensioner behöver ändras. Andra aspekter, till exempel långtidsstabilitet och inverkan av de accessoriska mineralen, behöver emellertid undersökas ytterligare.

Fältförsök med alternativa buffertmaterial i Lot-skala har installerats i Äspölaboratoriet.

Program

Större kunskap om alternativa buffertmaterial gör att upphandlingen kan optimeras med avseende på säkerhet, tillgänglighet och kostnad. Av denna anledning har fältförsöket ”Alternativa buffertmaterial” startats under 2006 för att bättre förstå för- och nackdelar som kan vara kopplade till olika tänkbara buffertmaterial. Försöket drivs i samma skala som Lot-försöket och består av tre paket, vardera bestående av 13 olika material, se figur 24-1. Varje paket har en värmare med en måltemperatur på cirka 130 °C. Det kortaste försöket kommer att pågå i minst ett år och det längsta i minst fem år. Paketerna är installerade och värmarna är aktiverade. Testplanen för analys av paketerna är under utarbetande. Flertalet internationella samarbetspartner deltar i och följer experimentet.



Figur 24-1. Installation av ett av paketen med 13 olika material i försöket "Alternativa buffertmaterial" i Äspölaboratoriet.

24.1.3 Porgeometri

I SR-Can ges som initialvillkor att bufferten i mättat tillstånd har en torrdensitet på $2\,000 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. Med förutsättningen att mineraldensiteten är $2\,750 \text{ kg/m}^3$ och vattendensiteten är $1\,000 \text{ kg/m}^3$ får vi en porositet på 43 procent och en torrdensitet på $1\,570 \text{ kg/m}^3$.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 påpekas att andra leror än MX-80 skulle kunna klara de konduktivitetskrav som ställs på bufferten. Ett val av en annan lera skulle eventuellt leda till att en annan densitet och porositet väljs. Det finns en viss osäkerhet vid bestämningen av mineraldensiteten, vilket gör att olika kombinationer av mättad och torrdensitet har rapporterats. Detta saknar dock praktisk betydelse.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Beräkningar med hjälp av teoretiska svälltrycksmodeller och laboratorieförsök ger en entydig bild av att vattnet i natriumbaserade bentoniter är mycket väl fördelat mellan mineralflaken. För kalciumdominerade system är bilden inte lika entydig.

Program

Buffertens mycket låga hydrauliska konduktivitet (trots att porositeten är cirka 40 procent) antyder att porvolymens fördelning har en avgörande betydelse för egenskaperna. Olika såväl kvalitativa som kvantitativa beskrivningar av porstruktur, och hur denna påverkar egenskaper som diffusion, konduktivitet och svälltryck, finns i litteraturen. SKB avser därför att fortsätta olika undersökningar med syfte att kvantifiera porstrukturer i tänkbara bentonitmaterial vid olika fysikaliska och kemiska förhållanden.

24.1.4 Strålintensitet

Dosraten på kapselytan beräknades i SR-Can till maximalt 500 mGy/h. Strålningen domineras av nukliden cesium-137. Dosraten används för att bedöma radiolys av porvatten och strålinducerade förändringar av montmorilloniten. Analyserna i SR-Can visar dock att betydelsen av båda dessa processer är försumbar.

24.1.5 Temperatur

Bufferten och återfyllningen har vid deponeringen omgivningens temperatur. Denna varierar med förvarsplatsen och deponeringsdjupet och är cirka 10–15 °C. Temperaturen beror till viss del på hanteringssekvensen, var buffertblocken har lagrats, värme från deponeringsmaskinen etc. Det är rimligt med en osäkerhet på omkring 5 °C.

Bestämningen av den initiala bufferttemperaturen är trivial, i motsats till värmetransporten i bufferten efter deponering, se avsnitt 24.2.11.

24.1.6 Vattenhalt

I SR-Can antas de kompakterade bentonitblocken ha en initial vattenkvot av 17 procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad av mellan 65 och 70 procent. Pelletarna i spalterna mellan bufferten och berget antas ha en initial vattenkvot av 10 procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad av 15 till 20 procent om inte spalten fylls med vatten. Eventuellt kan spalterna mellan blocken och berget reduceras till 2–3 centimeter, vilket gör att pelletar inte behövs. Spalterna mellan bufferten och kapseln, samt mellan bufferten och berget, kan eventuellt fyllas med vatten, men i SR-Can antas att de är torra. Vid horisontell deponering enligt KBS-3H-metoden antas den initiala vattenkvoten vara 10 procent runt kapseln.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I denna konstaterades att blocktryckningstekniken ska optimeras.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Vattenkvotens inverkan på beständigheten hos bentonitblocken har studerats i KBS-3H. Undersökningarna visar att blocken förblir intakta under olika lång tid om de exponeras för en bergyta med fritt vatten som rinner utefter bergytan 1–5 centimeter från blocken. De block som hade låg vattenkvot (10 procent) började spricka sönder omedelbart, medan blocken med hög vattenkvot (24 procent) inte visade några tecken på uppsprickning under tre månader.

Vid horisontell deponering enligt KBS-3H-metoden kan de bentonitblock som placeras mellan de perforerade supercontainrarna komma att tillverkas med en spalt till bergytan som är en centimeter eller mindre, vilket medför att den initiala densiteten måste vara lägre. Hög vattenkvot är fördelaktigt från hållbarhetssynpunkt för sådana block.

Program

Testen av vatteninnehållet i blocken kommer att fortsätta.

Utveckling av teknik för att framställa block med större höjd pågår och ska fortsätta, se del III, avsnitt 13.3.1.

24.1.7 Gashalter

Bentonitblocken har en vattenmättnadsgrad som kan variera mellan 65 och 70 procent. Det betyder att 70 till 85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft. Den yttre spalten lämnas ofylld. Luften i ett deponeringshål upptar cirka 6 procent av volymen. Osäkerheterna i gashalter är inte betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten. Den initiala gashalten följer ur vattenhalten och porositeten, se ovan.

24.1.8 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gastryck. Initialt är det relevant att beskriva gas- och vattentryck. Flöden förekommer inte initialt i bufferten. Vid inplacering av kapsel och buffert kommer deponeringshålen att hållas dränerade och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av 1 atm (cirka 0,1 MPa) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa i omgivningen. Däremot kommer det att finnas ett initialt porvattenundertryck i de omättade bentonitblocken som driver intransporten av vatten. Detta tryck är av storleksordningen 40 MPa.

24.1.9 Lastsituation

Svälltrycket börjar utbildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med externt vatten, se avsnitt 24.2.5 och 25.2.6. Initialt finns inget svälltryck.

24.1.10 Bentonitsammansättning

Bentonit är beteckningen på ett naturligt förekommande jordmaterial som är rikt på montmorillonit och har variationer i sammansättningen beroende på bildningssättet. Ofta förekommer bentonit i flera specifika lager, mellan vilka sammansättningen kan variera. I kommersiella produkter, till exempel MX-80, blandas vanligen material från olika lager för att uppfylla specificerade kvalitetskrav.

De kommersiella bentoniter som är intressanta som buffertmaterial har en förhållandevis konstant sammansättning. Smekthalten ligger normalt på cirka 80 procent. Bentonitmaterial för blocktillverkning kommer att genomgå en omfattande kvalitetskontroll före pressning. Vid den kontrollen bestäms bland annat montmorillonithalten.

Till bentonitens föroreningar räknas alla mineral utöver montmorillonit. Vanligtvis består föroreningarna till största delen av mineral som har liten betydelse för förvarets funktion (kvarts och fältspat). Små förekommande mängder av till exempel amorft kisel, kalcit, pyrit, siderit eller gips kan emellertid ha en viss betydelse för den kemiska utvecklingen i förvarets närområde, se avsnitt 24.2.17. Detta kan både vara till för- och nackdel för buffertegenskaperna. Ett exempel är kalcit som har en gynnsam pH-buffrande effekt, men som också kan anrikas vid kapseln under inverkan av en kraftig temperaturgradient. För närvarande finns emellertid inget mineral som i vanligt förekommande halter anses ha en avgörande negativ påverkan på förvarets funktion. Sammansättningen hos föroreningarna hos ett buffertmaterial kommer därför sannolikt att tillåtas variera inom vissa gränser mellan olika leveranser av materialet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB planerade att fortsätta utvecklingen av metoder för att testa och analysera svällbara mineral i tänkbara buffertmaterial.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

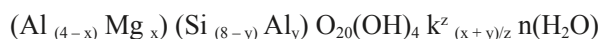
Nya metoder för att bestämma mineralfördelningen i buffertmaterial har använts och utvecklats. Den viktiga materialparametern katjonbyteskapacitet (CEC) har bestämts rutinmässigt med en relativt enkel metod /24-4/. Metoden har jämförts med andra för att säkerställa att den är pålitlig. Vidare har en analysmetod (Rietveldteknik) för att kvantifiera mineral från röntgendiffraktogram vidareutvecklats genom att programvaran Siroquant 3.0 tagits i bruk. Detaljerade bestämningar av mineralogin har gjorts för ett stort antal svällande leror /24-3/.

Program

SKB avser att fortsätta utveckling av test- och analysmetoder, samt att genomföra undersökningar av svällbara mineral i tänkbara buffertmaterial i enlighet med avsnitt 24.1.2.

24.1.11 Montmorillonitsammansättning

Montmorillonitens ideala strukturformel kan skrivas:



där summan av x och y per definition kan variera mellan 0,4 och 1,2 enheter (laddning per $\text{O}_{20}(\text{OH})_4$), och $x > y$. En viss andel aluminium (Al) kan betraktas som utbytt mot magnesium (Mg), och en mindre del kisel (Si) är utbytt mot aluminium (Al). Utbytet av trevärt aluminium mot tvåvärt magnesium leder till en negativ nettoladdning i mineralflaken som balanseras av utbytbara katjoner (k). I naturliga system förekommer dessutom andra substitutioner, till exempel kan järn ersätta aluminium i viss omfattning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Teknik för att bestämma montmorillonitens struktur skulle utvecklas. Vidare aviserades studier av förändringar till följd av uttorkning och exponering för luft.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Metoden att bestämma montmorillonitens medelstrukturformel har vidareutvecklats och har använts för ett stort antal svällande leror. Metoden innebär att montmorilloniten separeras från övrigt material, jonbyts till natriumform och de ingående huvudelementen bestäms med en enkel kemisk analys (ICP/AES). Medelstrukturformeln kan därefter beräknas med olika metoder /24-5/.

Program

Tekniken för att bestämma det svällande mineralets strukturformel kommer att vidareutvecklas. En väsentlig punkt är att bestämma järninnehållets valens i utgångsmaterialet, eftersom detta är avgörande för laddningsfördelningen vid bestämning av strukturen. SKB avser att studera eventuella förändringar i järnets valens, som följd av till exempel exponering för luftsyre och torkning, eftersom detta innebär en förändring av den totala flakladdningen. Mössbaueranalys kommer att provas i första hand. Den statistiska variationen i montmorillonitstrukturen för ett givet buffertmaterial är av intresse och kommer att studeras bland annat med hjälp av elementanalys i transmissionselektronmikroskop.

24.1.12 Porvattensammansättning

Bentonitlera i naturen innehåller vatten. Efter brytning torkas och mals leran. Vid leverans kommer vattenhalten att vara maximalt 12 procent enligt dagens specifikation. Före pressning till block tillsätts vatten för att nå en vattenhalt av cirka 17 procent, vilket motsvarar en vattenmättnadsgrad av 65 till 70 procent i de färdiga blocken. Koncentrationen av lösta ämnen i porvattnet beror således på mineralsammansättningen i bufferten, samt på vattenhalten vid olika tillfällen. En direkt mätning av utpressat porvatten är inte lämplig, bland annat beroende på att en tryckberoende jonjämvikt utbildas, se avsnitt 24.2.15. Vid materialleveransen kommer buffertmaterialet därför att analyseras med avseende på ingående mineral samt på joner i supernatanten hos dispergerat material (vattenlösningen ovanför uppslammat och centrifugerat prov). Detta ger en god uppfattning om porvattnets initialsammansättning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Kasam anser att SKB bör föreslå gränsvärden för föroreningshalter i bentonitbufferten.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

I en övergripande studie /24-3/ har mineralsammansättningen av ett flertal olika bentoniter bestämts, se avsnitt 24.1.2. Enligt SKB:s bedömning går det inte i dagsläget att föreslå meningsfulla gränsvärden för föroreningshalter i bentonitbufferten.

Program

Se avsnitt 24.1.2.

24.1.13 Konstruktionsmaterial

I deponeringshålen förväntas inga främmande konstruktionsmaterial.

24.2 Processer i bufferten

24.2.1 Översikt av processer

Vid inplaceringen kommer bufferten i kontakt med den varmare kapselytan. Genom värmetransport sprids värmeenergin genom bufferten och dess temperatur ökar. Den gamma- och neutronstrålning som tränger ut ur kapseln minskar i intensitet genom stråldämpning i bufferten.

I buffertens porer råder initialt ett kapillärt undertryck, som leder till att vatten transporteras in från det omgivande berget. Efter att bufferten mättats med vatten är transporten mycket långsam. Gastransport kan förekomma vid mättnadsförloppet, då ånga kan flöda från buffertens varmare delar för att kondensera i de yttre kallare partierna. Ursprungligen finns även luft i bufferten. Genom att lösas i porvattnet kan den lämna bufferten. Processen kallas gaslösning. Efter vattenmättnad kan gastransport förekomma om en kapsel skulle skadas med åtföljande vätgasbildning från korrosion av insatsen i kapseln.

Vid vattenupptaget sväller buffert och återfyllning, varvid ett svälltryck utbildas. Svälltrycket blir olika i buffert och återfyllning. Detta medför att dessa växelverkar mekaniskt. Svälltrycket är avgörande för den mekaniska växelverkan mellan kapsel och buffert och kan bland annat innebära att kapseln rör sig i bufferten. Vid uppvärmningen kan framför allt porvattnet utvidgas genom termisk expansion.

Den kemiska utvecklingen i buffert och återfyllning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. Vattenlösta ämnen kan transporteras genom advektion och diffusion. I bufferten förekommer advektion nästan uteslutande under vattenmättnadsförloppet, därefter dominerar diffusion. Genom osmos kan framför allt salthalten i grundvattnet påverka buffertens fysikaliska egenskaper. Jonbyte och sorption ersätter buffertens ursprungliga innehåll av laddningskompenserande motjoner med andra jonslag. Kemisk omvandling av buffertens svällande mineral kan förekomma med ändrade buffertegenskaper som följd. Andra mineral omsätts i bufferten bland annat genom olika lösnings- och fällningsreaktioner. Vid svällningen tränger bufferten ut i det omgivande bergets sprickor och kan där tänkas bilda kolloider, som kan föras bort av grundvattnet. Detta kan leda till en successiv erosion av bufferten. Leran kan omvandlas genom strålpåverkan och porvattnet kan sönderdelas av radiolys. Slutligen kan mikrobiella processer tänkas förekomma i bufferten.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer och möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Så länge det finns tillräckligt med bentonit kvar i deponeringshålet förväntas varken advektion eller kolloidtransport i en mättad buffert. Radionuklider kan sorberas till lerpartiklarnas ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form, som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering. Det radioaktiva sönderfallet bestämmer tillsammans med transportförhållandena i vilken utsträckning radionuklider från en otät kapsel hinner sönderfalla innan de når buffertens yttre gräns.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i bufferten. Många processer i bufferten är kopplade och behöver studeras integrerat. Sådana studier beskrivs till exempel i avsnitt 24.2.11.

24.2.2 Stråldämpning/värmealstring

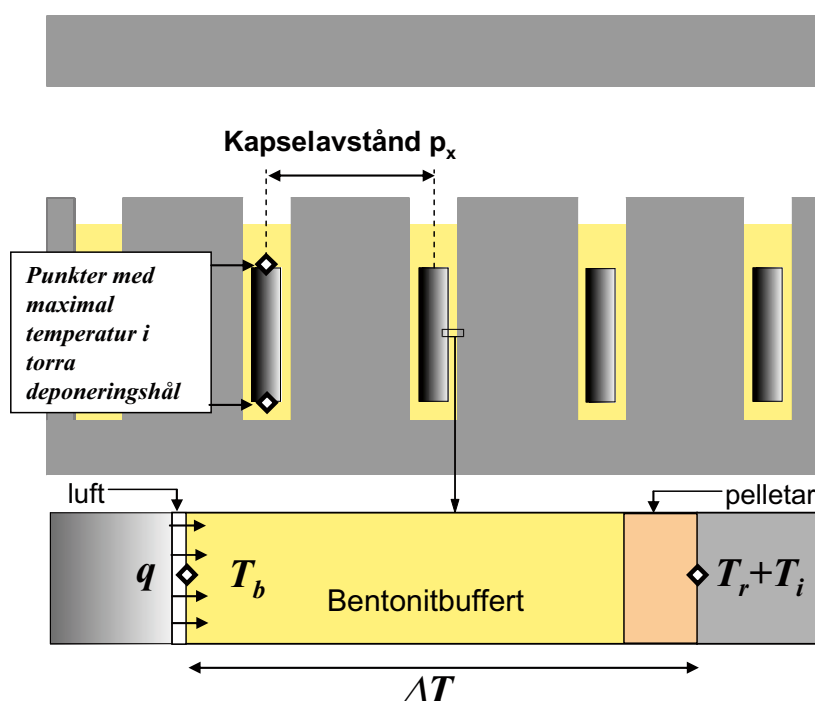
Gamma- och neutronstrålning från kapseln dämpas i bufferten. Dämpningens storlek beror främst av buffertens densitet och vattenhalt. Resultatet blir ett strålfält i bufferten. Strålfältet kan bland annat leda till radiolys av vatten och en marginell påverkan på montmorilloniten. Den strålning som inte dämpas i bufferten tränger ut i berget. Förståelsen av processen bedöms vara tillräcklig för säkerhetsanalysens behov.

24.2.3 Värmetransport

För fallet att bufferten är vattenmättad och utsvalld finns det en direkt termisk/mekanisk kontakt mellan kapsel och buffert samt mellan buffert och geosfär/återfyllning. Värmetransporten i deponeringshålet är då en fråga om linjär värmeledning under approximativt konstanta förhållanden. Den vattenmättade och homogeniserade buffertens värmeledningsförmåga ligger i intervallet 1,1–1,3 W/(m·K) /24-6/.

Under vattenmättnadsfasen är förhållandena mera komplicerade. Dels finns det ett visst vattenmättnadsberoende hos bentonitbufferten, dels finns det spalter mellan kapsel och buffert samt mellan buffertens huvuddel (bentonitblocken) och geosfären. Spalten mellan kapseln och den omättade bufferten är fylld med luft, medan spalten mellan bentonitblock och bergvägg kommer att vara fylld med bentonitpelletar.

Då bentonitbuffertens temperatur inte ska tillåtas överstiga 100 °C blir fallet med torra deponeringshål avgörande för den termiska dimensioneringen av förvaret, det vill säga för hur man ska välja kapselavstånd och tunnelavstånd vid givna värmetransportförhållanden i berget. Spalterna bidrar till att höja temperaturen på kapselytan och därmed också i de delar av bentonitbufferten som kommer att vara i direkt termisk kontakt med kapseln, det vill säga bentoniten intill kapselns ändtyor, se figur 24-2.



Figur 24-2. Närområdet med detalj från barriären vid kapselns höjdcentrum. I torra deponeringshål kommer bentonittemperaturen att vara högre vid kapselns ändtyor än vid höjdcentrum. T_b = bentonittemperatur vid höjdcentrum, ΔT = temperatursprång över bufferten (block och pelletar), q = värmeflöde från kapselytan, $T_r + T_i$ = temperatur på bergväggen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

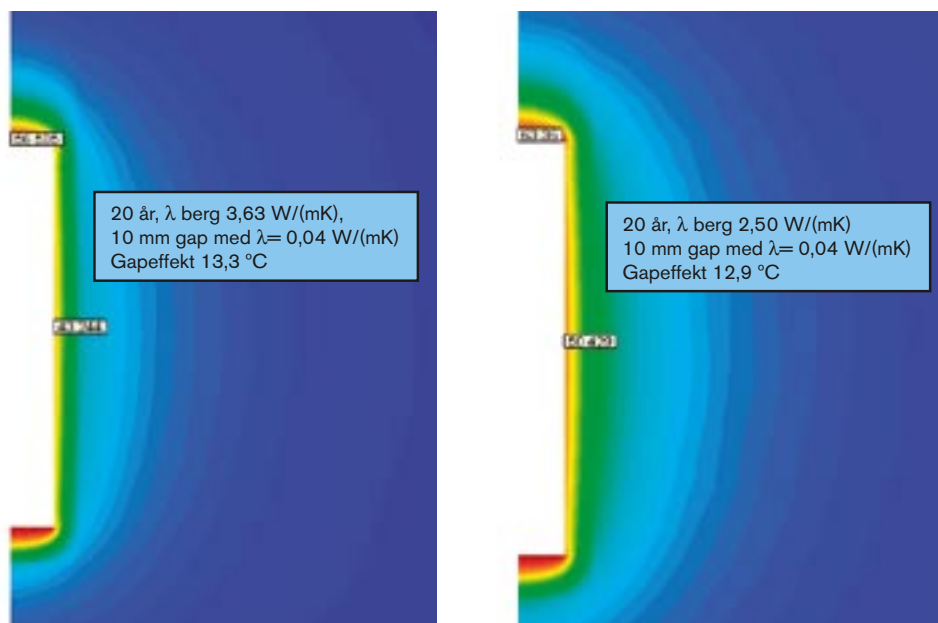
I Fud-program 2004 konstaterades att temperatursprånget mellan kapselyta och buffert som mest kan uppgå till omkring 17 °C vid tiden för temperaturmaximum, förutsatt att spalten mellan kapsel och bentonit är 10 millimeter vid deponering, att deponeringshålet är torrt och att den initiala kapseffekten är 1 700 W. Detta baserades på observationer från hål nummer 6 i Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. I Fud-program 2004 konstaterades vidare att den totala data- och modellosäkerheten när det gäller beräknade maximala kapsel- och bentonittemperaturer borde kunna beskrivas och gränssättas på ett mindre schematiskt sätt än hittills, till exempel som i /24-7/.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I TBT-försöket /24-8/ i Äspölaboratoriet har vi kunnat verifiera att buffertens värmeledningsegenskaper i deponeringshållsskala väl överensstämmer med de som bestäms i laboratorieförsök /24-6/. Detta bekräftas också preliminärt av termiska 3D-simuleringar av temperaturutvecklingen i Prototypförvaret /24-9/.

Ytterligare utvärderingar av resultat från Prototypförvaret har visat att värmetransporten över pelletsalten mellan bentonitblocken och bergväggen är förhållandevis effektiv också under den första tiden efter deponering, det vill säga innan pelletsalten tagit upp vatten från berget. Den torra pelletsalten tycks fungera som ett material med värmeledningstal mellan 0,4 och 0,6 W/(m·K) /24-10/. Det effektiva värmeledningstalet hos den omättade bufferten, det vill säga det sammantagna systemet av bentonitblock och pelletsalt, kan sättas till 1,0 W/(m·K). Den öppna spalten mellan kapsel och bentonitblock kan antas ha en konduktivitet av omkring 0,04 W/(m·K), varav ungefär 0,03 W/(m·K) beror på egentlig ledning, medan 0,01 W/(m·K) beror på värmestrålning /24-10/.

Figur 24-3 visar resultat från simuleringar av temperaturutvecklingen kring en KBS-3-kapsel, utförda med Code Bright. Cirka 20 år efter deponering medför den öppna spalten mellan kapsel och bentonit att bentonittemperaturen vid basytorna är cirka 13 grader högre än vid kapselns höjdcentrum.



Figur 24-3. Jämförelse mellan bentonitens temperatur vid kapselns höjdcentrum och vid kapselns basytor för två olika antaganden om bergets värmeledningsförmåga. Vid basytorna är bentoniten och kapseln i direkt termisk kontakt så att bentonit och kapselyta här har samma temperatur, vilket inte gäller vid kapselns höjdcentrum. Det omgivande bergets värmeledningsförmåga har en marginell inverkan på effekten av den luftfyllda spalten.

Temperaturskillnaden är proportionell mot kapsleffekten, som efter 20 år reducerats från 1 700 W till cirka 1 300 W. Om temperaturmaximum inträffar tidigare blir alltså effekten större. I den nya modellen för att beräkna den maximala bentonittemperaturen /24-10/ ingår tidsberoendet hos effekten av den öppna spalten, vilket innebär att vi inte, som tidigare, behöver lägga till en schematisk spaltmarginal vid den termiska dimensioneringen av förvaret /24-7/.

Program

Vid arbetet med att omsätta beräkningsmodellen till projekteringsanvisning för platserna fortsätter arbetet med att ta fram dimensioneringskriterier för tunnel- och kapselavstånd, se avsnitt 26.2.2.

Arbetet med simulering av de Termo-Hydro-Mekaniska processerna i Prototypförvaret fortsätter. I de stora 3D-modeller av hela Prototypförvaret som nu finns beaktas inte bevättningsförloppet. Resultaten från de stora 3D-modellerna kommer att användas för att definiera termiska randvillkor till detaljerade modeller av några av de olika deponeringshålerna i Prototypförvaret. Resultatet av de detaljerade THM-modellerna kan, tillsammans med motsvarande data från Prototypförvaret, komma att ge underlag för att bättre precisera buffertens värmetransportegenskaper och därmed bidra till att minska osäkerheterna i beräkningsmodellerna.

24.2.4 Frysning

Fritt vatten utan salt fryser vid temperaturer under 0 °C. När vatten genomgår fasförändring till is frigörs latent värme och volymen ökar (cirka 9 procent). I ett poröst medium med vatten i porerna fryser detta vatten till is vid tillräckligt låga temperaturer. Allt vatten blir inte is vid samma temperatur. En viss andel vatten kan kvarstå i ofruset tillstånd även vid temperaturer under nollpunkten. Andelen ofruset vatten beror på olika faktorer. Förutom temperaturen är mineralsammansättningen hos partiklarna, den specifika ytan hos partiklarna, vatteninnehållet, närvaron av lösta ämnen i vattnet och vattentrycket de mest betydelsefulla. För buffert på förvarsdjup sänker dessa faktorer fryspunkten. Vattentrycket och saltinnehållet sänker fryspunkten 0,5–1,0 grader vid 500 meters djup och den specifika ytan hos montmorillonit sänker fryspunkten mer än 5 grader i MX-80 hos allt vatten vid aktuella vattenkvoter. För bufferten är alltså frysning inget problem, se även avsnitt 21.4.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI rekommenderade SKB att överväga experiment med frysning och upptining av bufferten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I samband med SR-Can drogs slutsatsen att allt vatten i bufferten är ofruset vid temperaturer över –5 °C. Temperaturmodelleringar av glaciationsscenarier visar att sannolikheten för att temperaturen ska sjunka under –5 °C i bufferten, och således att frysning av vattnet i bufferten ska inträffa, är mycket liten. En ny modell baserad på termomekanik är under utveckling.

Program

Fortsatta teoretiska studier som kompletteras med laboratorieförsök för att verifiera teorierna och slutsatsen att inget vatten fryser vid temperaturer över –5 °C. Det huvudsakliga arbetet med frysning görs för återfyllningen, som dels fryser vid högre temperaturer och dels utsätts för lägre temperaturer i tunnlar och andra återfyllda utrymmen.

24.2.5 Vattentransport vid omättade förhållanden

När förvaret förslutits kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Under mättnadsfasen kommer bufferten att utbilda ett svälltryck som påverkar berget, kapseln och återfyllningen mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bufferten är en komplicerad process, som bland annat beror av temperatur samt av smektit- och vattenhalt i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är ett kapillärt undertryck i buffertens porer som leder till att vatten tas upp från berget.

De hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet avgör mätnadsförloppets utveckling. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad mellan kapseln och berget inom ett fåtal år. En rad förhållanden i berget har betydelse för vattentillgången.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Kunskapen är ofullständig och ett ganska omfattande program med laboratorie-, fält- och teoretiska studier skisserades.

SKI ansåg och frågade följande:

- Återmättnaden och den tidiga utvecklingen av bufferten bör behandlas ingående i kommande säkerhetsanalyser.
- De torrare förhållandena i Forsmarkslinsen behöver särskilt beaktas.
- SKB bör styrka sin tes att en långsam återmättnad inte har någon negativ påverkan. Vad innebär till exempel uttorkning nära kapseln, långsammare homogenisering av svälltrycket, försenad förslutning av sprickor, ackumulation nära kapselytan, snabbare vattenmättnad i återfyllningen än bufferten etc?
- Kan bergmatrisen bidra till återmättnad?
- Positivt att SKB använder Code Bright.
- I vilka tidsskalor homogeniseras bufferten?

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

I SR-Can dras slutsatsen att tiden till full vattenmättnad av bufferten till stor del beror av egenskaper hos och frekvens av vattenförande sprickor. Vid avsaknad av sprickor beror den av bergmatrisens hydrauliska konduktivitet. Om den senare är större än 10^{-12} meter per sekund styrs tiden av buffertens egenskaper, vilket gör att bufferten mellan kapsel och berg mäts inom några år. Bufferten ovan och under kapseln behöver cirka tio år till full vattenmättnad. Vid mycket torra förhållanden kan tiden till full mättnad uppgå till hundratals år, men detta påverkar inte bufferten menligt.

Kunskaperna om vattenupptagnings- och transportegenskaperna hos bufferten är tillräckliga för säkerhetsanalysen, men vissa parametrar och egenskaper har osäkerheter som innebär att de behöver studeras ytterligare. Beräkningarna har hittills utförts med antagande om att homogena förhållanden råder i bufferten från start (ingen hänsyn till pelletar och spalter). Bättre förståelse och verktyg för att ta hänsyn till dessa är under utveckling.

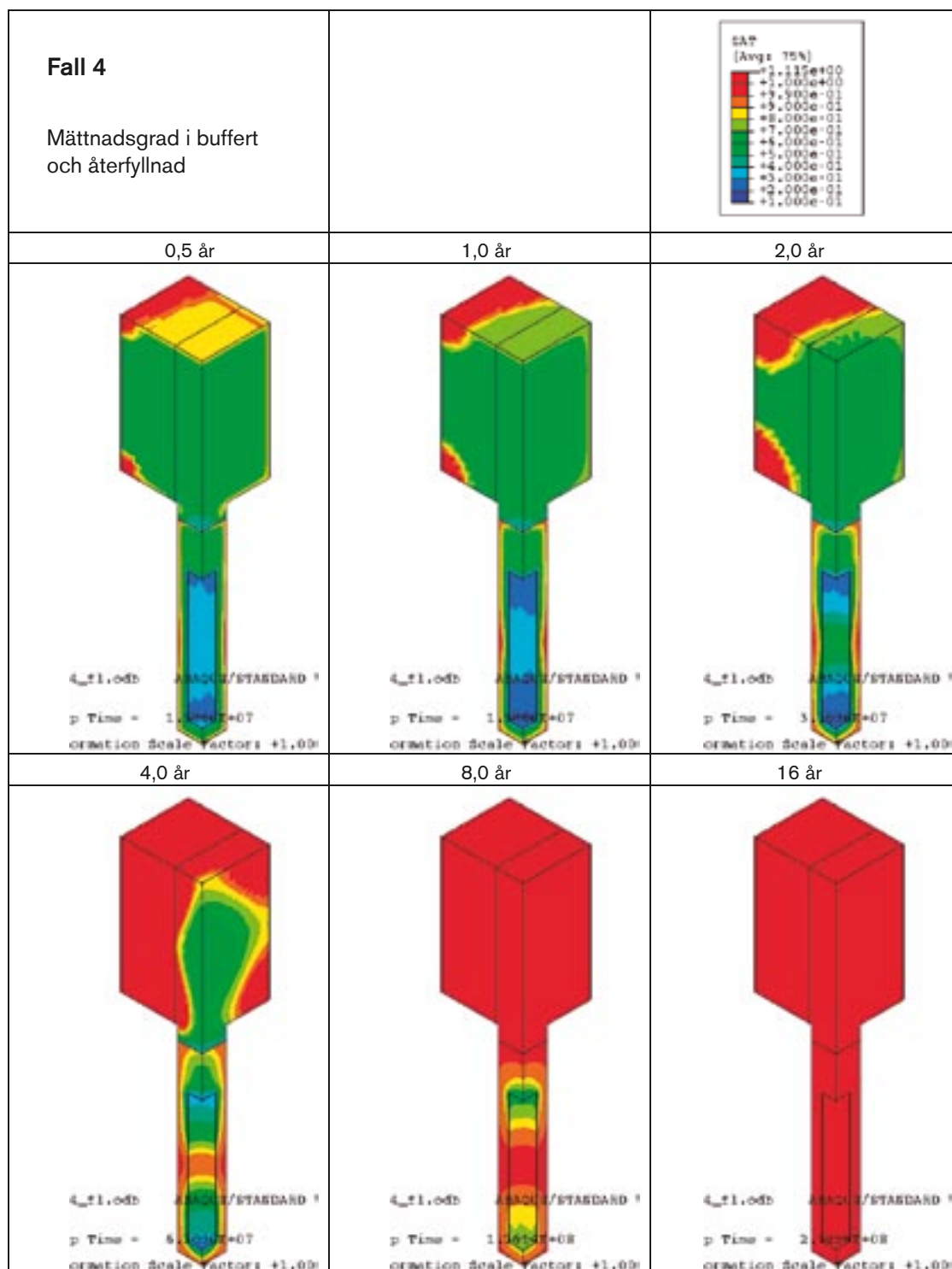
Arbetet med att studera vattenupptagningsprocessen i bufferten har varit omfattande. Studier har gjorts både i fält och laboratorium och även teoretiskt i form av modellberäkningar och modellutveckling. Här följer några exempel:

De största drivkrafterna för vatten i omättad buffert är porundertrycket och temperaturgradienten. Faktorer som påverkar porundertrycket är därför viktiga för vattentransporten. I ett doktorsarbete /24-11/ och efterföljande kompletteringar studerades hur porundertrycket varierar med initialtillstånd, vattenkvot och svälltryck. Dessa resultat har sedan använts både i modellutveckling och för att bestämma indataparametrar till beräkningarna. I försöken visas bland annat hur temperatur, hysteres, yttre tryck och vattenmättnadsgrad påverkar porundertrycket.

Vattenmättnadsprocessen studeras även i internationella samarbeten såsom Äspö Task Force on Engineered Barrier Systems (TF EBS) och Decovalex. I det förra genomförs modellering av väl kontrollerade laboratorieförsök, varvid modelleringsresultat och beräkningsresultat jämförs och modellernas lämplighet utvärderas. Modelleringsgrupper från åtta olika länder deltar.

Ett flertal modellberäkningar av vattenmättnadsförloppet i konceptet KBS-3V har utförts för att studera bergets och återfyllningens inverkan. Speciellt har inverkan av återfyllningen på tiden till full vattenmättnad hos bufferten studerats /24-12/. Resultaten visar bland annat att inverkan bara är signifikant om berget runt deponeringshålet är mycket torrt i jämförelse med berget i tunneln.

Tiden till full vattenmättnad hos bufferten reduceras med en faktor två om tillgången till vatten i återfyllningen är fri jämfört med om inget vatten finns i återfyllningen vid en hydraulisk konduktivitet av 10^{-13} meter per sekund i berget runt deponeringshålet. I några beräkningar har samverkan mellan buffert, återfyllning, berg och sprickor studerats i en tredimensionell geometri som simulerar ett slutförvar med oändlig utsträckning. Figur 24-4 visar ett exempel på en sådan beräkning där två vattenförande sprickor simulerats.



Figur 24-4. Exempel på beräkning av bevättningsförloppet i buffert och återfyllning. Vertikala sprickor som skär tunneln mitt emellan deponeringshålen och en horisontell spricka som skär deponeringshålet i kapselns mitt. Vattenmättnadsgraden vid olika tidpunkter visas.

Studier av vattenmättnadsförloppet har också gjorts vid ett flertal fullskaliga försök i Äspö-laboratoriet. I Återtagsförsöket, TBT-försöket och Prototypförvaret har bevätningen av bufferten följts med så kallade RH-givare, som mäter den relativa fuktigheten (RH) /24-13, 24-14 och 24-15/. Efter drygt fem års bevätning via filter på insidan av deponeringshålsväggen bröts Återtagsförsöket. Bufferten i den övre halvan av deponeringshålet har provtagits, varvid vattenkvot och densitet bestämts på ett stort antal prover. Både prediktiva modelleringar med Abaqus och mätningarna av relativ fuktighet i bufferten visade att man kunde förvänta sig att full vattenmättnad hade inträffat mellan berget och kapseln, men inte ovan och under kapseln. Provtagningen bekräftade detta såsom visas i ett exempel i figur 24-5.

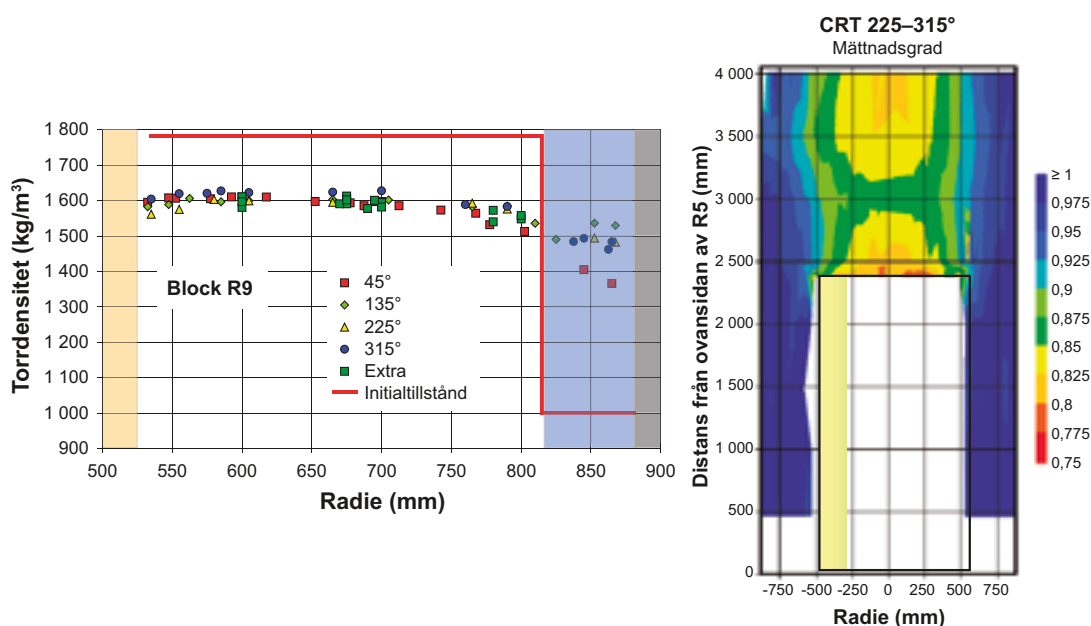
Motsvarande mätningar i Prototypförvaret, där bevätningen av bufferten sker från det naturliga berget, visar att bevätningshastigheten som förväntat varierar mycket mellan olika deponeringshål. Till exempel har bevätningen efter fem år gått långt i det blöta deponeringshål 1, medan vissa delar av det torra deponeringshål 2 visar ingen eller mycket långsam bevätning.

Dessa fältförsök har åtföljts av kopplade THM-modellberäkningar, där vattenmättnadsförloppet varit den viktigaste processen som studerats. För Återtagsförsöket har vissa beräkningar med Abaqus gjorts. Återtagsförsöket ingår som modelleringsobjekt i TF EBS, där detaljerade kopplade THM-beräkningar för att simulera händelseförloppet kommer att göras av ett flertal beräkningsgrupper. För Prototypförvarets del har modellering ingått i det EU-projekt som även omfattade installationen av försöket. Dessutom pågår THM-modellering av försöket med Code Bright som en del i uppföljningen.

TBT-försöket har föregåtts av både designmodellering och prediktering /24-16/. Parallellt med uppföljningen av mätdata har modellering av vissa fenomen utförts /24-17/. Code Bright har i huvudsak använts för dessa modelleringar.

Program

Laboratorie- och modellutvecklingsarbetet fortsätter för att ytterligare öka förståelsen och förbättra modellerna för bevätningprocesserna. Modellberäkningarna av de olika fältförsöken i Äspölaboratoriet fortsätter och jämförelser görs med dels mätdata från installerade givare och dels mätta faktiska förhållanden under urgrävning och provtagning (hittills enbart Återtagsförsöket). Modelleringsarbetet i de internationella projekten Decovalex och TF EBS fortsätter. Detta program behandlas närmare i avsnitt 24.2.11.



Figur 24-5. Exempel på resultat av provtagning i Återtagsförsöket. Den vänstra figuren visar uppmätt torrdensitet som funktion av radien mellan kapseln (525 millimeter) och berget (875 millimeter) i ring 9, medan den högra figuren visar vattenmättnadsgraden som nivålinjer i ett vertikalsnitt.

Eftersom den hydrauliska samverkan mellan bufferten och berget är avgörande för bevättningsförloppet planeras även ett fältförsök i Äspölaboratoriet. De båda internationella modelleringsprojekten (Task Forces) för tillverkade barriärer (TF EBS) och grundvattenflöde (TF GWFTS) ska studera och modellera detta i ett gemensamt projekt.

24.2.6 Vattentransport vid mättade förhållanden

Interaktionen mellan vatten och montmorillonitmineralet i bentoniten är grunden för buffertens tätande egenskaper. När allt porutrymme i bufferten är fyllt med vatten leder interaktionen till en effektiv fördelning av merparten av vattnet till ett cirka en nanometer tjockt vattenskikt mellan lerpartiklarna. Fördelningen, men framför allt den direkta kraftsamverkan mellan vattnet och montmorilloniten, är ett effektivt hinder för vattenrörelser. Vanligtvis anges flödesmotståndet för vatten i form av hydraulisk konduktivitet (K). Referensbentoniterna i SR-Can har en hydraulisk konduktivitet av cirka 10^{-13} meter per sekund, vilket är av samma storleksordning som sprickfri granit.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Laboratorieförsök med olika salthalter och jonslag skulle göras även med ytterligare ett antal bentonitmaterial. Konduktivitetmätningar skulle genomföras vid förhöjda temperaturer. Vidareutveckling av THM-modellerna för vattenmättad buffert skulle fortgå.

SKI påtalade att inverkan av höga salthalter bör undersökas vidare, samt att SKB behöver visa att en initial cementering inte påverkar buffertens egenskaper negativt. Bentonit från Milos behöver testas ytterligare med avseende på tätningsegenskaperna.

Inga tveksamheter rådde om buffertens förmåga att begränsa vattenflödet i deponeringshålen i enlighet med dess säkerhetsfunktion, förutsatt att ingen omfattande omvandling eller förlust av bufferten äger rum. Processen är emellertid kritisk, eftersom den är beroende av andra processer. Framför allt inverkar kolloidbildning med åtföljande förlust av buffertmaterial. Osäkerheten är ännu stor inom detta område.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Ett omfattande laboratorieprogram /24-3/ har genomförts med avseende på bland annat hydraulisk konduktivitet för ett femtontal olika bentonit- och svällande lermaterial (buffert och återfyllningskandidater). Programmet omfattade både bulkmaterial och material från lerfraktionen jonbytt till natriumform. Tätningsegenskaperna bestämdes som funktion av materialdensitet och salthalt. Vidare genomfördes en detaljerad mineralogisk analys av de ingående lermaterialen, vilket gör det möjligt att relatera den hydrauliska konduktiviteten till typen och mängden av svällande mineral.

Försök A2 i serien Long Term Tests of Buffer Materials (Lot) avslutades i början av 2006. Försöket hade då pågått i närmare sex år med exponering för grundvatten från Äspölaboratoriet och en högsta temperatur av 130 °C. Hela försökspaketet, inklusive 15 centimeter omgivande berg, friborrades och lyftes upp i ett stycke. Bentonitmaterialiet delades därefter under kontrollerade förhållanden. Ett omfattande analysprogram för försöksmaterialiet, med avseende på fysikaliska och mineralogiska egenskaper, har därefter genomförts. Fristående laboratorier i Finland, Frankrike, Schweiz och Tyskland har gjort analyser som komplement till de som utförts i svenska laboratorier.

Den hydrauliska konduktiviteten har bestämts för referensmaterial samt för material från A2-försöket som exponerats för förhöjda temperaturer (30 till 130 °C). Preliminära resultat visar att det exponerade materialet har en något lägre hydraulisk konduktivitet än referensmaterialiet.

Program

Laboratoriebestämningar av hydraulisk konduktivitet för prover tagna från Återtagningsförsöket vid Äspölaboratoriet kommer att genomföras enligt samma metod som användes för materialet i Lot A2.

Den hydrauliska konduktiviteten kommer att bestämmas för referensmaterialet samt för det exponerade materialet hos samtliga testmaterial i försöket ”Alternativa buffertmaterial” vid Äspölaboratoriet.

En specifik laboratoriestudie kommer att genomföras med syfte att i detalj bestämma sambandet mellan hydraulisk konduktivitet och svälltryck för såväl natrium- som kalciumdominerade bentoniter.

24.2.7 Gastransport/gaslösning

I fallet när en kopparkapsel är skadad och vatten kan komma i kontakt med insatsen kommer vätgas att bildas inuti kapseln. Löst gas transporteras långsamt genom bentonitbufferten. Det är mycket troligt att en gasfas och ett gastryck kommer att byggas upp inuti kapseln. Det är viktigt att kunna visa att detta tryck inte kommer att medföra några negativa konsekvenser för förvarets funktion. Detta innebär att gasen måste kunna ta sig ut utan att skada buffert eller berg.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Kasam ansåg att SKB:s forskning om gastransport i stor skala genom bentonit är angelägen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

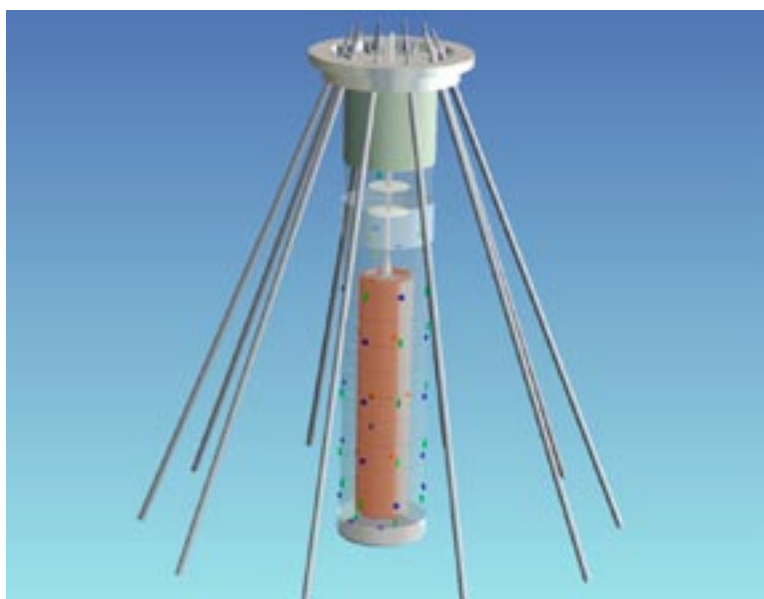
SKB:s forskning om gastransport har varit fokuserad på Lasgitförsöket i Äspölaboratoriet. Lasgit är ett fullskaleförsök med KBS-3V-geometri för att studera effekten av gastransport i bufferten. Figur 24-6 visar uppbyggnaden av Lasgit med instrumentering.

Lasgit installerades i februari 2005. Trots att Lasgit försetts med buffertblock med mycket hög initial vattenmättnadsgrad och att deponeringshålet är relativt vattenförande är bufferten fortfarande inte homogeniserad. Figur 24-7 visar trycksituationen i Lasgit efter 680 dagar.

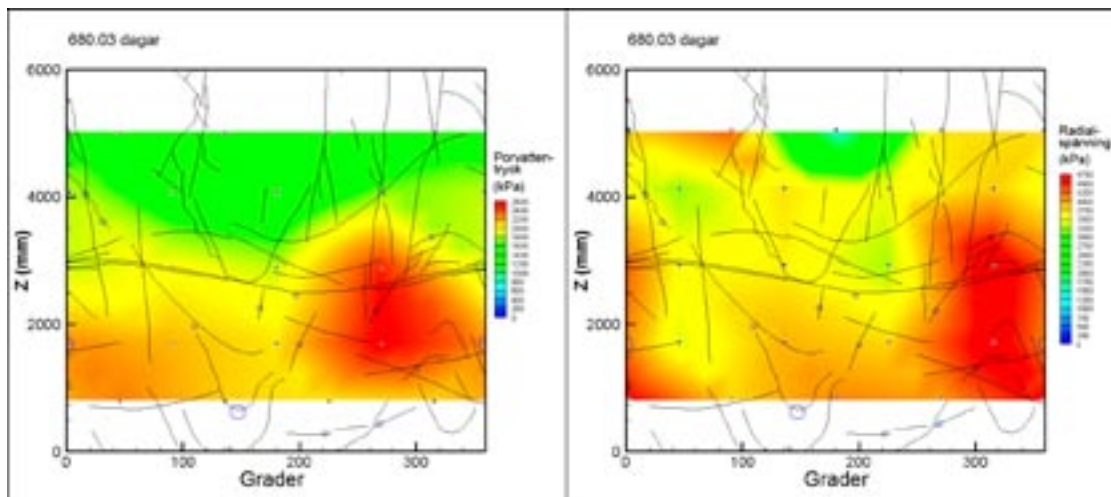
Program

Gas började injekteras i Lasgit under våren 2007. Detta skulle kunna ge preliminära resultat om hur gasuppbyggnads- och transportprocesserna går till. Eftersom bufferten inte har nått sitt jämvikts-tillstånd måste dock resultaten från den första försöksserien behandlas med viss försiktighet.

Baserat på resultaten och erfarenheterna från den preliminära gasinjekteringsserien kommer ett program för fullständiga tester att tas fram.



Figur 24-6. Lasgit med plugg, ankare, injekteringssystem och instrumentering.



Figur 24-7. Figur (a) och (b) visar fördelningen av porvattentryck och radialsättning (svälltryck) mätt i gränsoområdet mellan buffert och berg i deponeringshålet i Lasgit efter 680 dagar. En zon med förhöjd radialsättning kan klart ses i figur (b).

24.2.8 Piping/erosion

Vatteninflödet i deponeringshålen och tunnarna i ett slutförvar sker i huvudsak genom sprickor i berget och medför att buffert och återfyllning beväts och homogeniseras. Men i allmänhet kan inte bufferten eller återfyllningen absorbera allt vatten som rinner genom en spricka, varför ett vattenövertryck bildas när inflödet hindras. Om inte mottrycket och hållfastheten i bufferten eller återfyllningen är tillräckligt stora kan kanalbildning (piping) med åtföljande erosion uppstå.

Processerna och konsekvenserna i samband med kanalbildning och erosion har studerats i några projekt, varvid ett flertal laboratorieserier i olika skala har genomförts. Kunskapen är i dag otillräcklig och fler studier behöver utföras och pågår. Den kanalbildning och erosion som avses här uppstår i första hand innan full vattenmättnad uppnåtts.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 behandlades problemet i huvudsak i relation till KBS-3H, där det är extra kritiskt eftersom kanalbildning och erosion som uppstår långt in i deponeringstunneln kan fortplantas genom hela tunneln förbi alla utanföriggande kapslar. Där konstaterades att en spalt i storleksordningen flera centimeter inte förmår stoppa vatteninflödet i basscenariot (0,1 liter per minut inflöde per kapselsektion), utan att en teknisk lösning krävs /24-18/. Försök ska göras för att bättre förstå hur kanalbildning uppkommer. Även erosion ska studeras om man konstaterar att kanalbildning inte kan undvikas.

Synpunkter och frågor från granskningen:

- Kan erosion eller kemiska omvandlingar ge heterogenitet i bufferten?
- SKI ansåg att SKB i första hand ska utreda om bufftererosion och kanalbildning är ett problem för referenskonceptet KBS-3V.
- SKI efterlyste modellering av förlopp som skulle kunna påverka buffertens homogenitet och svällande egenskaper, till exempel eventuella massförluster av bentonit nära buffertens gränsyta mot berget.
- Det återstår ett antal kritiska osäkerheter att utreda, till exempel risk för erosion under deponering.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Värdefulla slutsatser drogs i samband med SR-Can. För Forsmark är ett typiskt inflöde i ett deponeringshål 0,01 liter per minut. För detta värde kommer kanalbildning och åtföljande erosion förmodligen inte att inträffa. Genom val av deponeringshålsplacering och genom att utesluta några hål bör kanalbildning kunna undvikas helt i deponeringshålen.

För Laxemar är inflödena betydligt högre. Av hålen förväntas 20 procent få ett inflöde över 0,1 liter per minut. Genom val av deponeringshålsplacering, injektering och uteslutande av vissa hål bör man klara en sådan gräns även i Laxemar.

SR-Cans processrapport för buffert och återfyllning konstaterar också att kunskapen i dag är otillräcklig för att bestämt kunna fastställa gränser för när kanalbildning och skadlig erosion inträffar.

Ett flertal försöksserier, inom främst projekten KBS-3H och Baclo, har ökat förståelsen för dessa processer men fortfarande återstår mycket att göra. Dagens kunskapsnivå är sammanfattad i en rapport /24-19/.

Eftersom ett mottryck i form av svälltryck eller någon typ av ”inlåsning” behövs från kraftjämviktssynpunkt för att stoppa kanalbildning, kan man förstå att det antingen krävs att spalten är mycket liten så att ett matchande svälltryck kan byggas upp snabbt, eller att geometrin gör att kanalbildningen stoppas av valv- eller inlåsningseffekter. Det är troligen det senare som gör att kanalbildning tycks kunna stoppas i spalter mindre än 0,5 centimeter vid de besvärligaste referensfallen (se nedan) om förbättring görs.

Erosionsmätningarna visar att erosionen är känslig för salthalt och den tycks minska med tiden. Den kan mätas som andel material i vattnet och minskar med tiden snabbt till mellan 1 och 10 gram per liter.

Processerna har observerats i fält, speciellt i Lasgit där inflödet 0,2 liter per minut resulterade i en erosion som inte stannade av, utan fortgick med takt av cirka 1 gram per liter tills inflödeskällan kortslöts.

Program

Kanalbildningsförsöken i projektet KBS-3H fortsätter. Där undersöks under vilka villkor kanalbildning kan förhindras och även hur man med tekniska lösningar kan minimera risken. Inflöden 0,1–1,0 liter per minut och tryckstegringshastigheter mellan 100 kPa/h och 1 000 kPa/h vid förhindrat flöde studeras. För KBS-3V behöver troligen tester med rätt geometri och buffert göras för att undersöka var gränserna går. Eventuellt behövs en teknisk lösning vid höga inflöden.

Erosion studeras främst i Baclo-projektet, där olika material utsätts för olika flödes hastigheter och den eroderade mängden mäts. Ytterligare tester där inverkan av flödeslängd och tid studeras behöver göras.

I fält kan resultatet studeras vid brytning av hål 1 i Prototypförvaret där vatteninflödet vid installationen var 0,08 liter per minut. Om erosionen fortsatt under fem år bör konsekvenserna kunna studeras vid brytningen. Hittar man inga bentonitförluster är det ett starkt stöd att sätta gränsen vid 0,1 liter per minut.

24.2.9 Svällning

Svällningsprocessen har slagits samman med andra spännings- och töjningsrelaterade processer som kan förorsaka massomfördelning i bufferten såsom termisk expansion, kryprorelser och ett antal interaktioner med kapsel, närområdesberg och återfyllning.

I bufferten och återfyllningen, som är inhomogena vid inplaceringen, kommer vattenupptaget efter deponeringen att leda till svällning. Den medför att alla spalter i bufferten och mellan berg och buffert och mellan kapsel och buffert försvinner och att bufferten homogeniseras. Emellertid kommer en viss inhomogenitet att kvarstå på grund av friktion i bentoniten. I bufferten leder dessutom uppvärmningen till termisk expansion av porvattnet. Om svällningen förhindras utbildas i stället ett svälltryck.

I kontaktytan mellan bufferten och återfyllningen uppstår en växelverkan genom att bufferten utövar ett svälltryck mot återfyllningen och vice versa. Eftersom det finns en skillnad i svälltryck uppstår ett nettotryck mot återfyllningen, varvid bufferten sväller och återfyllningen komprimeras. Uppsvällningens storlek beror på buffertens och återfyllningens ursprungliga densiteter. Den är avhängig expansions- och kompressionsegenskaperna samt friktionen mot berget. Beräkningsmodeller för att analysera denna samverkan finns (både analytiska och numeriska).

Mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel uppkommer genom att bufferten genererar både tryckspänningar och skjuvspänningar. Växelverkan uppkommer också genom porvattnet, som bara genererar tryckpåkänningar, och genom gas i bufferten som också bara genererar tryckpåkänningar. Under vattenmättnadsprocessen förändras dessa tre variabler. Kapselns tyngd påverkar bufferten, medan buffertens tyngd på kapseln endast påverkar marginellt. Bergrörelser som uppstår i sprickplan, till exempel efter jordskalv, ger upphov till påkänningar på kapseln. Dessa förmedlas från berget genom bufferten. Processerna vid den mekaniska växelverkan mellan buffert och kapsel efter vattenmättnad förstår man relativt väl. Osäkerheten består framför allt i bevätningens jämnhet och tryckuppbyggnaden vid eventuella gasbildningar. En annan osäkerhet är kryprörelser hos kapseln orsakade av kapselns tyngd.

Den mekaniska växelverkan mellan buffert och närområdesberg orsakas bland annat av svälltryck från bufferten, konvergens av deponeringshål och skjuvrörelser i berget. Konvergens behandlas i avsnitt 26.2.9. I KBS-3H kommer först bentoniten att tränga genom den yttre perforerade supercontainern och vidare in i utrymmet mellan berget och containern. På lång sikt kommer containern att korrodera. Omvandlingen från järn till magnetit innebär en ökning av volym och ett ökat tryck mot berget och kapseln.

Svällningen leder till att lera tränger in i bergets sprickor. Svällningsegenskaperna medför också att en skada som uppstår i bufferten, till exempel efter kanalbildning och erosion, gasgenomträngning eller bergrörelser, kommer att svälla igen och läka.

På lång sikt kan kemiska förändringar i bufferten leda till att svällnings- och deformationsegenskaperna förändras, se avsnitt 24.2.17. En modell för svällning under vattenmättade förhållanden finns framtagen för finita elementkoden Abaqus sedan tidigare. Svällning förekommer även under vattenmättnadsfasen, se avsnitt 24.2.11.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I programmet fastslogs följande:

- Laboratorieförsök och modellutveckling för att ytterligare studera svällningsegenskaperna ska fortsätta.
- Undersökningar av hur porvattenkemi och densitet påverkar svällningsegenskaperna hos andra buffertkandidater ska göras.
- Studier i KBS-3H av samverkan med den perforerade supercontainern ska fortgå bland annat i den storskaliga försöksutrustningen ”Big Bertha”.
- Konsekvenserna av växelverkan mellan bufferten och olika typer av återfyllningar ska utredas.
- Ytterligare modellering av bergskjuvning ska göras och behovet av att göra ytterligare experiment ska övervägas.

Följande frågor och synpunkter har framförts vid granskningen:

- I vilka tidsskalor homogeniseras bufferten?
- Kan erosion eller kemiska omvandlingar ge heterogenitet i bufferten?
- SKB skulle behöva utreda vid vilken densitet kapselsjunkning kan uppstå för att kunna ange säkerhetsmarginalen till 2 000 kg/m³.
- Storskaliga försök med skjuvning skulle kunna ge värdefullt underlag till framtida säkerhetsanalyser.

- SKI efterlyste modellering av förlopp som skulle påverka buffertens homogenitet och svällande egenskaper.
- Hur viktigt är det att homogeniteten uppnås inom en viss tid?
- Det återstår ett antal kritiska osäkerheter att utreda, till exempel kring det mekaniska samspelet mellan buffert och återfyllning.
- Den tidiga uppsvällningen av bufferten borde kunna studeras med inaktiv demonstrationsdeponering.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ett par funktionsindikatorer som formuleras i SR-Can berör dessa processer:

- Svälltrycket ska vara högre än 1 MPa överallt i bufferten för att säkerställa god kontakt med berget.
- Svälltrycket ska vara högre än 2 MPa överallt i bufferten för att förhindra bakteriell aktivitet. Denna gräns gäller dock direkt efter vattenmättnad och homogenisering. Vid förlust av bentonit i ett senare skede gäller 1 MPa.
- Densiteten efter full vattenmättnad får inte vara högre än 2 050 kg/m³ för att förhindra skador på kapseln vid berg rörelser.

I SR-Can drogs bland annat slutsatsen att svälltrycket från bufferten inte har menlig påverkan på kapseln och att uppsvällningen mot återfyllningen inte påverkar densiteten runt kapseln /24-20/. En lokal förlust av 100 kilo bentonit i ett deponeringshål kan homogeniseras tillräckligt för att upprätthålla erforderligt svälltryck. Inte ens vid förlust av en hel bentonitring förväntas advektiva förhållanden uppstå. Beräkningar har också visat att marginalen är mycket stor till dess att kapselsjunkningen blir kritisk. Svälltrycket 200 kPa ger endast två centimeters sjunkning.

I SR-Can konkluderas också att kapseln klarar en bergskjuvning av 10 centimeter genom ett deponeringshål, även efter omvandling av bufferten till kalciumbentonit vid den ogynnsammaste skjuvriktningen. Däremot återstår en del osäkerheter för bland annat påverkan på kopparlocket och konsekvenserna av att bufferten delvis cementeras.

Några serier med mätning av svälltryck har utförts. Bland annat har inverkan av porvattenkemin och montmorillonitnehållet i bufferten undersökts. Mätning av svälltrycket hos alternativa buffertmaterial har också gjorts liksom hos material från Lot-försöket. Det senare hade stått under fem år i maximalt 130 °C. Ingen inverkan på svälltrycket kunde upptäckas.

Vid brytning av det ovanstående Lot-paketet upptäcktes däremot att spännings-töjningsegenskaperna ändrats i den varma delen. Brottet vid enaxliga tryckförsök var sprödare än förväntat. Om detta är ett tecken på begynnande cementering kan det betyda att parametrarna för till exempel bergskjuvberäkningarna bör ändras. Orsaken måste undersökas.

Vid brytning av Återtagningsförsöket i Äspölaboratoriet togs ett stort antal prover i den övre halvan av deponeringshålet. Mätning av densitet och vattenkvot visade hur långt homogeniseringen gått, se till exempel figur 24-5 i avsnitt 24.2.5.

Ett flertal beräkningar av effekter av svällning och homogenisering av buffert i olika scenarier har genomförts. Buffertens mekaniska egenskaper, som kontrollerar svällnings- och konsolideringsfasen, är baserade på modeller och egenskaper som härletts för MX-80. Modellering av effekter av bentonitförlust har gjorts med Abaqus. Bentonitförluster i tre olika skalor har studerats:

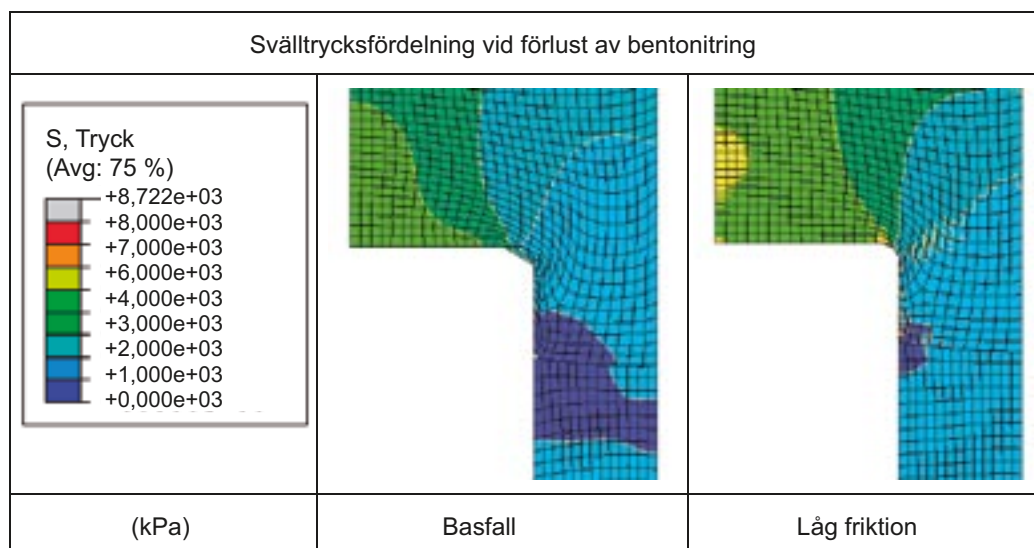
- Om erosionen på grund av kolloidtransport är så stor att den motsvarar att ett eller flera bentonitblock tappas sväller tomrummet igen med en bestående kraftigt reducerad densitet, speciellt nära kapseln. Figur 24-8 visar exempel från en beräkning. När stora mängder bentonit försvinner, eller saknas från start, sväller bentoniten och fyller tomrummen. Den resulterande densiteten och svälltrycket är ganska låga beroende på friktionen i bufferten och mot bergytan. För en öppning på 50 centimeter blir svälltrycket i medeltal 0,5–1,0 MPa i nästan hela det tidigare hålet. Om bergytan är slät och friktionen mot berget halveras, kommer svälltrycket att vara över 1 MPa i huvuddelen av det tidigare utrymmet.

- Vid erosion under installation är värsta tänkbara fallet ett flöde på 0,1 liter per minut in i ett deponeringshål. Flödet eroderar 10 gram torrsvikt bentonit per liter vatten. Under en period på tolv veckor ger detta ett totalt vattenflöde av 12 100 liter och en total massa av eroderad bentonit av 121 kilo. Beräkningarna av svällningen och homogeniseringen av bufferten efter en lokal bentonitförlust av denna storleksordning har gjorts med antagande av två olika hålgeometrier. I en av geometrierna simulerades en halv ring, som är belägen vid bergytan och sträcker sig runt deponeringshålets periferi. Resultaten visar en bestående reduktion av densitet och svälltryck beroende på friktionen i bentoniten. Svälltrycket efter avslutad homogenisering blir dock inte under 1 MPa i något av fallen med en ringtjocklek på mellan 3,4 och 13,4 centimeter.
- Kanalbildning och erosion i bufferten leder till att en kanal uppstår. Kanalen leder vattnet och bentonitlösningen ut genom bufferten in i återfyllningen. En sådan kanal kommer till slut att svälla igen och tätas när vattenflödet har upphört. FE-modellering av processen med självförsegling av långa öppna kanaler i kompakterad bentonit har givit några intressanta resultat. En lång öppen kanal förseglas inte helt och hållet, utan en lägre densitet med ett oändligt litet hål kommer att bestå.

Osäkerheterna avseende materialmodellen vid kraftigt svällande bentonit gör dessa resultat något osäkra, särskilt vid höga portal (kvoten mellan porvolymen och det fasta materialets volym). Vissa resultat bör därför kontrolleras med svällningsförsök i laboratorium.

Beräkningar av uppsvällningen av bufferten mot återfyllningen har gjorts för ett flertal olika återfyllningsmaterial /24-21 och 24-22/. Förutom basfallet med 30/70-blandning har beräkning gjorts för Friedlandlera och Asha 239 bentonit. Även en förenklad beräkning av uppsvällningen mot block av Friedlandlera med pelletar i spalterna under antagandet att återfyllningen förblir obevätt under hela bevätningen av bufferten. Beräkningarna gav en uppskattad uppsvällning av cirka 8 centimeter. Osäkerheter i antaganden och beräkningar gör dock att resultaten måste anses som preliminära och att kompletterande tester och beräkningar behöver göras.

Inverkan av bergskjuvning med hastigheten 1 meter per sekund längs en spricka genom ett deponeringshål i ett KBS-3V-förvar har undersökts för ett antal olika skjuvfall och för olika egenskaper hos buffertmaterialet /24-23, 24-24 och 24-25/. Scenarierna har modellerats med finita elementmetoden och beräkningarna gjorts med koden Abaqus. En 3D-elementmodell har använts för att modellera berg, buffert och kapsel. Kontaktelement som kan simulera separation har använts till kontaktytorna mellan buffert och berg och mellan buffert och kapsel.



Figur 24-8. Beräknad svälltrycksfördelning efter igensvällning av ett hål motsvarande förlusten av en 0,5 meter hög bentonitring: basfallet med friktionsvinkeln 8,7 grader mot bergväggen och ytterligare ett fall med halverad friktion på grund av slät vägg.

Inverkan av lutningen hos den korsande sprickan, skjuvriktningen, skjuvplanet läge, skjuvlängden, bentonittyp (Ca eller Na) och bentonitdensitet har studerats. Dessutom har konsekvenserna av omvandling av bufferten till illit eller cementerad bentonit undersökts.

Påverkan på kapseln är alltid störst för kalciumbentonit på grund av högre svälltryck och större styvhet hos bentoniten. Största skadan inträffade efter 20 centimeters skjuvning i kalciumbentonit med densiteten 2 050 kg/m³. Största plastiska töjningen blev 19 procent i kopparröret och 13 procent i stålinsatsen (fast för olika skjuvfall). Motsvarande efter 10 centimeters skjuvning var 10 procent och 5,4 procent. För natriumbentonit blev största plastiska töjningen 8 procent (5,5 procent) i kopparröret och 3,6 procent (1,3 procent) i stålinsatsen där värdena inom parentes är efter 10 centimeters skjuvning.

Konsekvenser av omvandling till illit är till fördel för kapseln (på grund av kraftigt sänkt svälltryck). Partiell cementering, med tjockleken 8,75 centimeter runt kapseln, medför att påverkan av en bergskjuvning blir allvarligare än för den ursprungliga opåverkade bentoniten, eftersom cementeringen ökar styvheten hos bufferten. Egenskaperna hos cementerad bentonit är inte kända, så den utförda beräkningen bör ses som ett exempel snarare än en prediktion.

Den vertikala förskjutningen av kapseln i konceptet KBS-3H har studerats i ett antal konsoliderings- och krypberäkningar med FE-programmet Abaqus. Krypmodellen som använts i beräkningarna är baserad på Singh-Mitchells krypteori. Modellen har anpassats till och verifierats för buffermaterialet i tidigare tester. För konsolideringsberäkningarna har en materialmodell med Porous Elastic och Drucker-Prager plasticitet använts. För att förenkla och renodla analyserna har bufferten antagits vara fullt vattenmättad från start.

Två typer av simuleringar har gjorts. De två fallen representerar två extremfall, det ena med en återfyllning som har låg styvhet och det lägsta tillåtna svälltrycket och det andra med en återfyllning i tunneln som har högsta möjliga styvhet och svälltryck.

Beräkningarna inkluderar två steg, där det första modellerar den svällning och konsolidering som äger rum för att bufferten ska uppnå kraftjämvikt. Detta steg äger rum under bevättningsfasen och den påföljande konsoliderings- och svällningsfasen. Det andra steget modellerar deviatorisk krypning i bufferten under 100 000 år.

Beräkningarna visar att kapselsättningen är mycket liten, även vid låga svälltryck och densiteter. Basfallet, motsvarande det förväntade slutliga buffertsvälltrycket 7 000 kPa, resulterar i en total sättning av kapseln på endast 0,35 millimeter i fallet med fix rand. Kapseln reser sig cirka 4,5 millimeter i fallet med 30/70 återfyllning, eftersom bufferten expanderar uppåt. Vid ett minskat svälltryck ökar sättningen, men den är inte mer än 23 millimeter vid det mycket låga svälltrycket 80 kPa i båda fallen. Figur 24-9 visar konsolideringen och krypsättningen som en funktion av svälltrycket för båda beräkningarna.

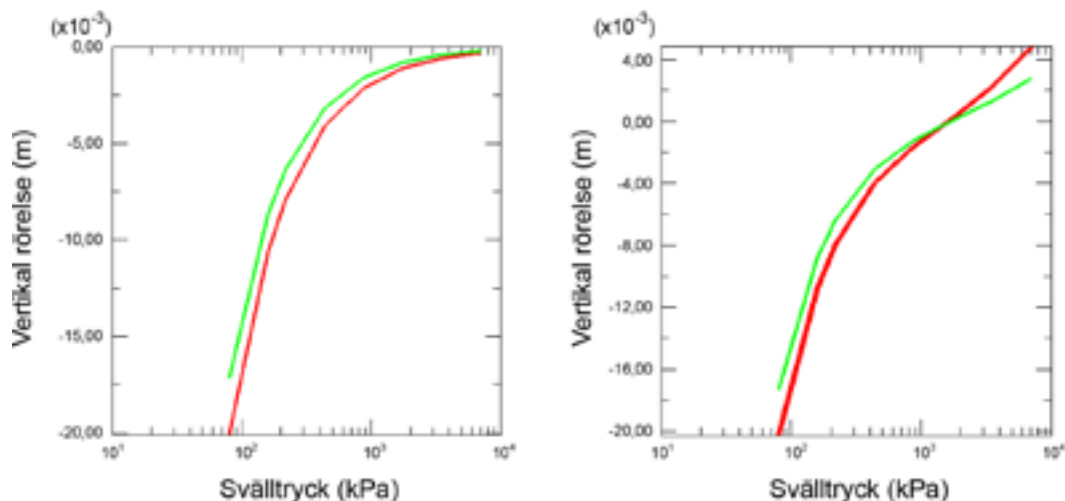
Program

Svällning och massomfördelning är viktiga processer för slutförvarets funktion. Både förståelse och modeller behöver förbättras.

Arbetet med laboratorieförsök och modellutveckling för att studera svälltryckets uppbyggnad under bevättningsfasen och dess påverkan på och beroende av porundertrycket kommer att fortgå, se avsnitt 24.2.11 och avsnitt 24.2.14.

Kontroll av utsvällning av bentonit genom hålen i den perforerade supercontainern i KBS-3H kommer att göras i ett försök där hålgeometri och spaltvidd simuleras i full skala (Big Bertha).

Utvärdering och ytterligare undersökningar av prover från det brutna Återtagningsförsöket i Äspö-laboratoriet kommer att göras tillsammans med modellering.



Figur 24-9. Vertikal rörelse hos kapseln som funktion av svälltrycket i de två fallen fix rand buffert/återfyllning (vänster) och fri rand med 30/70 återfyllning (höger). Negativ rörelse betyder sjunkning. Röd linje: Enbart konsolidering/svällning. Grön linje: Konsolidering/svällning plus krypning.

Svällnings- och homogeniseringsprocessen kommer att studeras i ett antal laborieförsök och modellberäkningar. Detta arbete avses leda till antingen en bekräftelse av befintliga modeller eller en förbättrad modell. Följande försök planeras eller övervägs (och modelleras):

- Enaxliga svällningsförsök i ödometer med konstant radie och antingen rå eller friktionsfri rand (ödometerring).
- Radiella svällningsförsök i ödometer där en rörformad öppning får svälla igen.
- Skalförsök (1:10) av ett deponeringshål med förlorade bentonitringar enligt modelleringen beskriven ovan.
- Dito men i full skala i Äspölaboratoriet (övervägs).

Kapselskjuvning av ett jordskalv kommer att undersökas ytterligare både i laboratorium och med modellering:

- Modellering av och jämförelse med de tre skalförsök som gjordes i början av 1990-talet med vattenmättad MX-80 som buffert och ren solid koppars kapsel. Tre försök i skala 1:10 med olika skjuvningshastighet genomfördes. Stora mängder data och information finns tillgängliga från dessa. Genom att använda dagens materialmodeller och räkna i Abaqus på samma sätt som visats ovan och jämföra resultaten kan modellerna verifieras eller förbättras.
- Laborieförsök med kalciumbentonit för att bekräfta eller modifiera materialmodellen. Modellen för kalciumbentonit har bestämts genom att modifiera modellen för natriumbentonit med hjälp av kunskapen om skillnaden mellan dessa material.
- Förnyade modellberäkningar kan vara aktuella att göra med bland annat realistisk geometri hos locket.
- Andra skjuvförsök kan bli aktuella om så behövs för att verifiera modellerna.

Orsaken till och konsekvensen av det spröda beteendet hos bufferten som upptäckts i Lot-försöket ska undersökas och utvärderas.

Ytterligare laborieförsök med mätning av det effektiva trycket under och efter det att höga vattentryck lagts på ska göras för att undersöka om cykler av höga vattentryck kan påverka svälltrycket.

24.2.10 Termisk expansion

Vid temperaturförändringar i bufferten kommer volymen att förändras mer hos porvattnet än hos mineralfasen. Porvattentrycket stiger vid en temperaturökning. Temperaturskillnader mellan olika delar av bufferten leder därmed till tryckskillnader, som i sin tur medför att porvattnet rör sig för att utjämna skillnaderna. Denna process skulle kunna åstadkomma höga tryck mot berg och kapsel om vattenmättnaden inträffar före temperaturmaximum. Processen är väl känd hos vattenmättad bentonit. För omättad bentonit är den termomekaniska teorin inte komplett, men konsekvenserna av denna process bedöms i det fallet som oväsentliga för säkerheten. Termisk expansion ingår i den kopplade THM-modellen, se avsnitt 24.2.11.

24.2.11 Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert

När förvaret förslutits kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Vattenuptaget påverkar och påverkas av en rad kopplade termiska, hydrauliska och mekaniska processer. Inom SKB:s program pågår såväl omfattande experimentellt som modellutvecklingsarbete inom området.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Ett omfattande program med modellering och modellutveckling, uppföljning av fältförsöken i Äspölaboratoriet och laborieförsök sattes upp i Fud-program 2004.

SKI ansåg att betydande framsteg har uppnåtts under senare år för modellstudier, utveckling av koder och experiment. SKI menade också att SKB – inför kommande ansökningar – genom praktiska experiment behöver visa att kunskapen om och modellerna för buffertens funktioner är tillräckliga.

SKI tyckte att den tidiga utvecklingen av bufferten bör behandlas ingående i kommande säkerhetsanalyser, att de torrare förhållandena i Forsmark särskilt beaktas, undrade om bergmatrisen kan bidra till bevätningen och ville att SKB visar att en konsekvens av torra förhållanden i form av långsam återmättnad inte har någon negativ inverkan. SKI tyckte det är positivt att SKB använder Code Bright.

SKI ansåg att SKB generellt har en bra uppsättning försök i Äspölaboratoriet.

SSI bedömde att SKB bedriver ett ambitiöst arbete med modellutveckling och omfattande laboriestudier kring bentonitbuffertens egenskaper och funktioner, men också att SKB måste göra en förnyad analys av behovet och tillräckligheten av långtidsförsök i Äspölaboratoriet avseende buffertens och återfyllningens funktioner.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Integrerade studier är inte behandlade i SR-Can som en särskild process, utan är i Processrapporten uppdelat på termiska, hydrauliska och mekaniska processer. Kopplingen av THM-processerna under mättnadsfasen är inte avgörande för slutförvarets säkerhet, men viktig för förståelsen av hur bufferten beväts, sväller och homogeniseras under inverkan av temperaturförändringar. Den är också viktig för förståelsen och utvärderingen av fältförsöken i Äspölaboratoriet.

Kopplade THM-processer under vattenmättnadsfasen och deras samverkan med berget, kapseln och återfyllningen har studerats både genom utveckling av materialmodeller och modellering av olika försök och scenarier, genom mätning av THM-processerna i storskaliga försök i fält och genom laborieförsök i liten skala. Se även avsnitt 24.2.3 och 24.2.5.

Modellstudier

Under de senaste tre åren har Code Bright använts för kopplade THM-simuleringar av ett antal experiment. Detta gäller de försök som har analyserats inom Task Force EBS och inom TBT-projektet (TBT 2 och TBT 3) /24-16 och 24-17/. Dessa arbeten har gett nya insikter om fuktomfördelning vid termiska gradienter, mekaniska processer och dynamiken för gasgenombrott. Storskaliga TH-modeller har också gjorts av TBT- och Prototypförsöken i Äspölaboratoriet.

Det har dock visat sig att det behövs mer arbete för att kunna exekvera storskaliga fullt kopplade modeller med tillräcklig numerisk stabilitet. Behovet av ett alternativ till BBM (Barcelona Basic Model), som ligger till grund för de mekaniska konstitutiva lagarna i Code Bright, har också uppmärksammas. BBM är en elastoplastisk modell med två oberoende variabler (nettopspänningen och portryckspotentialen) och är framtagen för omättade jordar.

Beskrivningen av de mekaniska processerna i omättad MX-80 bentonit har därför utvecklats. Stor vikt har lagts på att tydliggöra BBM-modellens dynamik och relevans, för att därmed ta fram den bästa strategin och relevanta parametervärden för att simulera block och pelletar i KBS-3 med nuvarande implementering av Code Bright. I detta arbete har även de vedertagna svälltrycks- och vattenhållande egenskaperna relaterats till de mekaniska deformations sambanden, vilket i sin tur har lett fram till ett ramverk för en ny elastoplastisk modell. En viktig del av arbetet har varit att kunna utvärdera parametervärden ur olika typer av laboratorieförsök på ett för BBM-modellen konsistent sätt.

Modellberäkningar med befintliga modeller för omättade processer i Abaqus har även gjorts. Dessa har bland annat omfattat studier av mättnadsprocessen i KBS-3V-deponeringshål med fullt kopplade THM-beräkningar av samverkan med återfyllning, berg och kapsel /24-1/. Motsvarande modellberäkningar för ett förvar med horisontell deponering görs inom Decovalex-projektet.

Task Force on Engineered Barrier Systems (TF EBS), med deltagare från åtta organisationer som representerar olika länder, är en naturlig fortsättning på modelleringsarbetet i Prototypförvaret. Arbetet startade i slutet av 2004 och ska under den första fyraårsperioden omfatta två benchmarkstudier där kopplade THM-processer i omättad bentonit studeras, nämligen småskaliga laboratorieförsök och storskaliga fältförsök. Under de två första åren har Benchmark 1 utförts. Studien har omfattat modellering av ett antal laboratorieförsök med MX-80 och Febex-bentonit, vilka exponerats för olika temperatur- och vattensituationer. Arbetet inom Task Force EBS har hittills medfört en fördjupad förståelse för kodernas förmåga att modellera olika tillstånd i mättnadsprocessen.

Modellering av THM-processerna i bufferten i Prototypförvaret pågår och kopplas till ovannämnda utveckling av de mekaniska processerna med framtagning av parametervärden etc. Hänsyn till initiala skillnader i densitet mellan buffertblocken och den pelletfyllda spalten inkluderas i modellen.

Fältstudier

Experimentella studier av de kopplade THM-processerna vid omättade förhållanden har gjorts både i fält och laboratorium. I Åspölaboratoriet pågår ett flertal fältförsök där dessa processer mäts under realistiska förhållanden. Prototypförvaret, Återtagsförsöket och TBT är de främsta exemplen. Dessa försök omfattar både våta och torra förhållanden och drivs olika lång tid. Detta medför att mätresultaten från såväl installerade givare som mätningar på prover tagna vid utgrävningar kommer att kunna användas för många olika bevättningsfall vid utvärdering av de kopplade THM-processerna, bland annat genom jämförelser med modellberäkningar. Återtagsförsöket bröts våren 2006 och ger värdefull information om de kopplade processerna, se även avsnitt 24.2.5.

Laboratorieförsök

Kunskaperna om de kopplade hydromekaniska processerna i omättad bentonit har ökat genom de laboratoriestudier som dels lett fram till en avhandling /24-11/ och dels fortsatt med nya försök inriktade mot att definiera parametervärden i Code Bright. Den övergripande målsättningen för avhandlingen var att utveckla en konceptuell modell av det hydromekaniska uppförandet hos bentonit. Påverkan av försöksteknik undersöktes också för att kunna utvärdera försöksresultaten på ett korrekt sätt.

Huvudmålet med laboratorieprogrammet var att undersöka hur de vattenhållande egenskaperna påverkades av förhindrad svällning, utvecklingen av svälltryck vid minskat porundertryck samt påverkan av yttre tryck och svälltryck på porundertrycket. Försökstyperna som valdes för majoriteten av försöken var stegvis ökning av den relativa fuktigheten tillsammans med fri svällning alternativt förhindrad svällning med samtidig mätning av svälltryck. Dessutom genomfördes försök med konstant vatteninnehåll och ett yttre pålagt tryck. I dessa försök mättes den relativa fuktigheten.

Resultaten från laborieförsöken användes för att finna ett samband mellan vattenkvot, portal, svälltryck och porundertryck. Vid analysen av försöksresultaten har det förutsatts att jämvikt uppnåtts i proverna.

Det uppmätta axiella svälltrycket P_a , som uppkom under vattenupptag vid förhindrad svällning hos prover, normaliserades med ett tryck P_{ret} motsvarande svälltryck vid vattenmättnad. Denna normalisering utfördes för att P_a skulle vara oberoende av portalet. De normaliserade axiella svälltrycken från en typ av prover visas i figur 24-10.

En relation mellan det normaliserade svälltrycket och mättnadsgraden S_r enligt ekvation 24-1 föreslås. I denna ekvation är $P(S_r, e)$ svälltrycket, $P_{ret}(e)$ svälltrycket vid vattenmättnad, $S_{r,ini}$ mättnadsgraden vid start och e portalet.

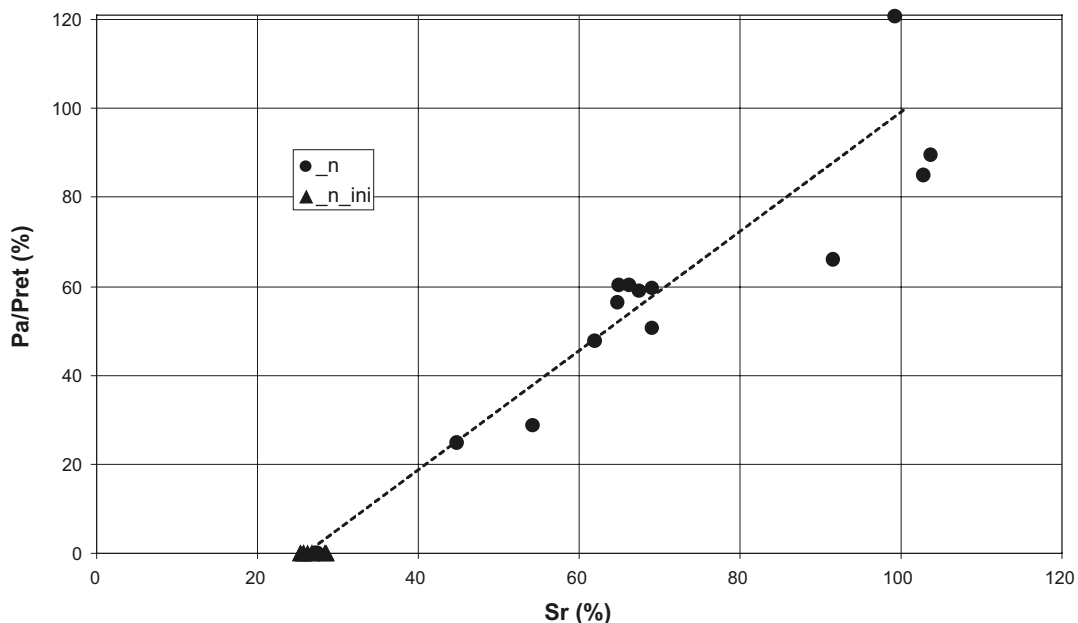
$$P(S_r, e) = \frac{S_r - S_{r,ini}}{1 - S_{r,ini}} \cdot P_{ret}(e) \quad (24-1)$$

Ekvation 6-2 nedan baseras på en termodynamisk relation för vattenmättnad, som också jämförts med laborierresultaten i studien. Ekvationen relaterar svälltrycket $P(RF, w)$ till aktuell relativ fuktighet i bentonit RF och den relativa fuktigheten enligt vattenhållningskurvan $RF_{ret}(w)$ för den aktuella vattenkvoten w . R är allmänna gaskonstanten, T temperatur, ρ_w vattnets densitet och ω_v vattenångans molekylvikt.

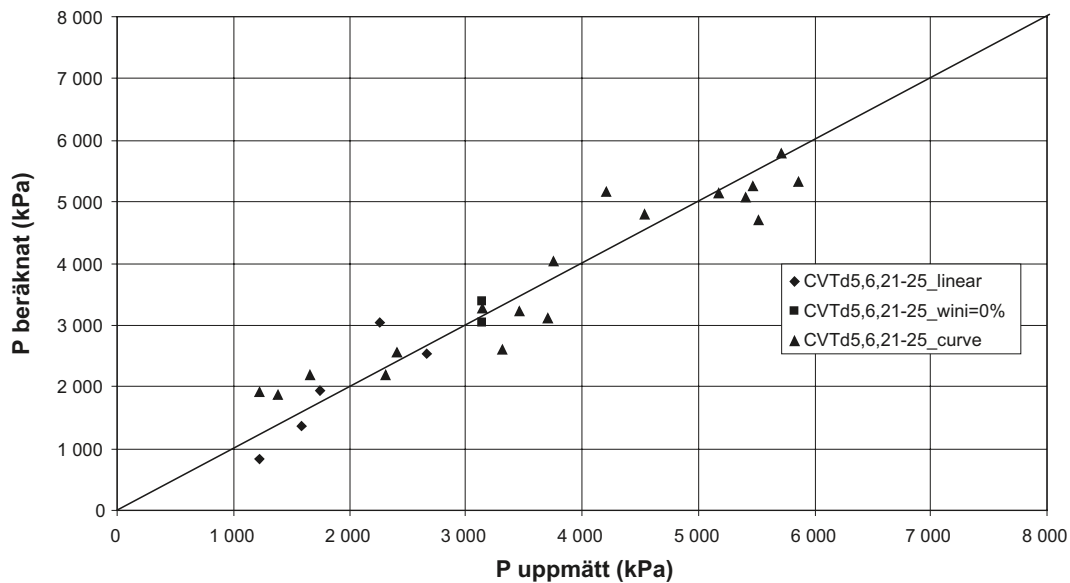
$$P(RF, w) = -\frac{R \cdot T \cdot \rho_w}{\omega_v} \cdot \ln\left(\frac{RF_{ret}(w)}{RF}\right) \quad (24-2)$$

Exempel på uppmätta svälltryck och beräknade svälltryck från ekvation 24-2 visas i figur 24-11. Överensstämmelsen visade sig vara god. Symbolerna avser olika sätt att bestämma RF_{ret} .

En modell bestående av ekvationerna 24-1 och 24-2 föreslås. Modellen kan användas när man känner till två av de fyra parametrarna (vatteninnehåll, portal, svälltryck och porundertryck). Den kan användas för att till exempel utvärdera fältmätningar och för att modellera det senare stadiet av en bevättningsprocess. Ekvationerna baseras huvudsakligen på resultat från försök som genomförts med en ökad vattenmättnadsgrad och med konstant portal, men de föreslås även kunna användas för ökande portal.



Figur 24-10. Normaliserade axiella svälltryck (P_a/P_{ret}) från en typ av prover med olika mättnadsgrad (S_r). En prickad linje binder samman förhållandet vid start med förhållandet vid ett mättat tillstånd.



Figur 24-11. Uppmätt svälltryck och beräknat svälltryck enligt ekvation 24-2. Linjen visar lika tryck.

För närvarande pågår ett försöksprogram som är en fortsättning på det beskrivna arbetet för att ytterligare öka förståelsen för och förbättra modellerna av THM-processer i vattenomättad bentonitbuffert. Ett viktigt syfte med försöksprogrammet är att bestämma kompressionsmodulen och svällning-krympningsmodulen och övriga parametrar som behövs för att modellera med beräkningskoden Code Bright men också för att studera alternativa modeller.

I KBS-3H har ett flertal integrerade studier utförts. Ett intressant exempel är en studie av hur vatten diffunderar från en våt bergyta över en luftfylld spalt till en fri yta hos ett bentonitblock. Genom att mäta ökningen av vikt och volym hos bentoniten som funktion av tiden vid olika spaltvidd och olika ursprunglig vattenkvot hos bentoniten kan en modell för denna kopplade process kontrolleras. Både liten laboratorieskala och skalan 1:5 har studerats. Studien behandlade även sprickbildningar i bentoniten.

Program

Modellstudier

FE-koderna Abaqus och Code Bright är de som främst används för att modellera kopplade THM-processer i omättad buffert och återfyllning. Eftersom Abaqus har brister som inte går att åtgärda har Code Bright blivit det instrument som kommer att användas framöver för mer kvalificerade studier av processer och konsekvenser av olika bevätningsscenarioer. Det finns ett behov av att utveckla Code Bright, dels beträffande kodens urval av mekaniska och hydrodynamiska konstitutiva samband, dels beträffande kodens urval av elementtyper.

För att kunna göra relevanta förutsägelser av spänningsuppbyggnad och förskjutningar, behövs en ny elastoplastisk modell som implicit tar hänsyn till de vedertagna svälltrycksegenskaperna. En sådan mekanisk modell bör använda vattenkvoten som tillståndsvariabel i stället för portryckspotentialen.

För att kunna göra korrekta simuleringar av fukttransporten, behövs nya uttryck för beskrivningen av transportkoefficienterna. Detta gäller såväl det advektiva vätskeflödet som den diffusiva ångtransporten. I detta arbete behövs också en generell utveckling av hanteringen av gasfasen, i synnerhet för att kunna beskriva gasgenombrott. I kodens nuvarande implementering är de vattenhållande egenskaperna definierade som ett samband mellan portryckspotentialen och vattenmättnadsgraden. I stället är det önskvärt att ha en mer fysikaliskt relevant representation som relaterar portryckspotentialen till en vattenkvot och ett spänningstillstånd. Det är också en ambition att kunna hantera hystereseffekter.

Slutligen finns ett behov av att utöka kodens urval av elementtyper i koden. För närvarande finns endast standardelement implementerade. För att korrekt kunna simulera spalter och axiella rörelser i deponeringhålen behövs kontaktelement och friktionselement.

För att kunna utveckla materialmodellerna och användbarheten hos Code Bright har källkoden införskaffats. Förbättringar av till exempel materialmodellerna och nya subrutiner kommer att implementeras i koden och testas.

De internationella projekten drivs vidare. I TF EBS kommer fältförsök att modelleras och resultaten jämföras med mätresultat. Först modelleras de båda fältförsöken i URL Buffer/Container Experiment och Isothermal Test, där speciellt samverkan mellan torrt berg och buffert kommer att studeras. Därefter kommer Återtagsförsöket i Äspölaboratoriet att användas som benchmarktest, se avsnitt 24.2.5.

Modellberäkningarna i Decovalex-projektet kommer att fortsätta med fokus på samverkan mellan buffert och berg. Modelleringen av Prototypförvaret med Code Bright fortsätter och kopplas till utvecklingen av de hydromekaniska modellerna.

Fältstudier

Resultaten av mätningar och provtagningar i Återtagsförsöket kommer att användas bland annat i TF EBS för jämförelser med modelleringsresultat.

De pågående fältförsöken i Äspölaboratoriet (till exempel Prototypförvaret och TBT) drivs vidare med mätning av THM-processer. Vid en framtida brytning kommer noggranna provtagningar och bestämningar av egenskaper att göras på liknande sätt som i Återtagsförsöket. Jämförelser mellan uppmätta data och modellerade förväntade resultat kommer att ge värdefull information om bland annat samverkan mellan berg och buffert under bevättningsprocessen, speciellt för Prototypförvaret där naturlig bevätning från berget sker i deponeringshål med mycket varierande hydrologiska förhållanden.

Nya fältförsök kommer att övervägas. De försök som är aktuella är en fullskalig simulering av en sektion i ett KBS-3H-förvar och ett nytt Prototypförvar för KBS-3V.

24.2.12 Advektion

Lösta ämnen kan transporteras med porvattnet genom tryckinducerat flöde. Processen har betydelse i bufferten under den omättade perioden, då en nettoströmning av vatten sker in till bufferten. Det viktigaste kravet på buffertmaterialet är att det ska förhindra strömning kring kapseln under mättade förhållanden. Transporten av ämnen i porvattnet domineras då av diffusion, se avsnitt 24.2.13. Vattenflöde i bufferten under omättade och mättade förhållanden behandlas i avsnitt 24.2.5 och 24.2.6.

I SR-Can konstaterades att advektion kunde bli en dominerade transportprocess i det fall där en stor mängd buffert hade förlorats genom erosion, se avsnitt 24.2.18.

24.2.13 Diffusion

Lösta ämnen kan transporteras i stillastående porvatten genom diffusion. Därigenom rör sig ämnen från områden med högre koncentration till områden med lägre. Processen leder till omfördelning av lösta ämnen i porvattnet och påverkar alltså porvattensammansättningen.

Diffusionsprocessen är starkt sammankopplad med nästan alla kemiska processer i bufferten, genom att den svarar för fram- och borttransport av reaktanter och reaktionsprodukter. Därmed är diffusion en central process för hela den kemiska utvecklingen i bufferten. Processen ingår som en del i avsnitt 24.2.23 om radionuklidtransport.

24.2.14 Osmos

Buffertens tätande egenskaper, huvudsakligen högt svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, är intimt kopplade till bentonitens förmåga att ta upp och binda vatten. Bindningskraften hos bentonitmaterial beror huvudsakligen på andelen montmorillonit samt på detaljerna i montmorillonitens mineralstruktur. För ett givet bentonitmaterial avtar bindningskraften med ökande mängd absorberat vatten. Sambandet kan mätas och brukar beskrivas med en så kallad vattenhållningskurva. Även andra komponenter i ett förvarssystem (till exempel omgivande berg, salt i grundvattnet och bakterier) kan binda vatten i olika grad, varvid konkurrens om vattnet uppstår. Bentonitens svälltryck påverkas därigenom, vilket kan beskrivas kvantitativt som osmotiska tryckförändringar.

Förhållandena i ett deponeringshål med bentonit och grundvatten är typiska för system som kan beskrivas med Donnan-jämvikt, vilken karakteriseras av att någon ingående jon inte fritt kan diffundera i systemet, vanligtvis på grund av jonens storlek. I högkompakterad bentonit är det de laddade enskilda montmorillonitflaken som har en mycket begränsad rörlighet på grund av sin storlek och det stora antalet flak. Förutsättningarna för jämvikt i ett sådant system är att produkten av diffunderbara joners kemiska aktivitet är lika i grundvattnet och i porvattnet mellan bentonitflaken, och att elektrisk neutralitet råder i båda avdelningarna. Mineralflakens naturliga och förhållandevis höga negativa laddning kompenseras av motjoner. I kompakterad bentonit innebär fördelningen mellan bentonit och vatten en motjonkoncentration på flera mol per liter. Detta innebär att jonkoncentrationen i porvattnet kommer att domineras av montmorillonitens motjoner även för relativt höga salthalter i grundvattnet. En ökning av grundvattnets jonkoncentration leder därmed till en betydligt mindre ökning av jonkoncentration i porvattnet. Skillnaden i koncentrationsökning innebär en ny osmotisk jämvikt, vilket innebär en reduktion av bentonitens svälltryck. Tryckförändringarna kan beräknas eftersom aktiviteten hos motjoner och joner i grundvattnet kan bestämmas.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB konstaterade att bentonit som utsatts för varierande natriumkloridhalter, både i laboratorieförsök som vid naturlig exponering, reagerar i enlighet med vad som kan beräknas med jonjämvikt.

SKB avsåg att studera effekten på svälltryck och hydraulisk konduktivitet av andra jonslag än natrium och för olika typer av bentoniter.

SKI anser att inverkan av salta grundvatten bör studeras ytterligare för att bland annat ge ett utförligt underlag för kriteriet för maximal salthalt, samt för att studera effekten av gradvisa variationer mellan söta och salta vatten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB anser att tätningsegenskaperna hos bufferten inte påverkas så mycket av tryckeffekten vid höga salthalter under KBS-3-förhållanden. Tätningskraven på tunnelåterfyllningen är lägre än i bufferten. Vid låg salthalt i grundvattnet kan kraven uppnås med natriumbentonit med relativt låg densitet. Ett sådant material är emellertid inte lämpligt, eftersom tätningsegenskaperna försämras vid höga salthalter. SKB avser i stället att använda material med hög densitet, antingen en blandning av bergkross och bentonit eller ett naturligt lermaterial med motsvarande halt av svällande mineral.

Ett omfattande laboratorieprogram har genomförts, vilket omfattat olika koncentrationer av natrium-, kalcium-, magnesium-, kalium- och kopparklorids effekter på olika bentoniter och andra svällande leror /24-3/. I svenska grundvatten är kalcium den enda positiva jonen – förutom natrium – som finns i koncentrationer som har betydelse för osmotiska effekter. Merparten av studien inriktades därför på förhållanden med natrium- och kalciumklorid.

Försöket A2 i Lot-serien vid Äspölaboratoriet har brutits och analyserats, se avsnitt 24.2.6. Grundvattnet i Äspölaboratoriet har en total salthalt på ungefär 1,2 viktprocent och de positiva jonerna domineras av ungefär lika massandelar kalcium ($40 \times 0,06$ gram per liter) och natrium ($23 \times 0,1$ gram per liter). Svälltrycket hos den exponerade bentoniten har studerats i efterföljande laboratorieförsök. Resultaten visar förväntade små förändringar som följd av grundvattnets salthalt (24.2.6).

Den konceptuella modellen för jonjämvikt har förbättrats och beräkning av effekterna på svälltryck kan göras med hänsyn till ingående joners kemiska aktivitet. Tryckberäkning med hjälp av jonjämvikt har mycket god överensstämmelse med resultat från laboratorieförsök för alla undersökta natriumkloridlösningar (0,1 till 3,0 M) och bentonitdensiteter. Laboratorieförsöken visar vidare att de negativa effekterna av höga saltkoncentrationer är mycket mindre i kalciumdominerade system än i natriumdominerade. Beräkning med jonjämvikt visar kvalitativt samma effekt, men överensstämmelsen är inte lika god som för natriumdominerade system.

Program

SKB anser att processen är väl belyst med avseende på natriumdominerade system och att vidare insatser inte är motiverade. För kalciumdominerade system är de osmotiska effekterna mindre än för natriumdominerade system, både enligt laboratorieförsök och teoretiska beräkningar. Nuvarande beräkningsmodell visar emellertid inte lika god samstämmighet med laboratorieförsök med avseende på kalciumsystem. Modellen för jonjämvikt utgår från en analytisk beräkning av de laddningskompenserande jonernas fördelning mellan mineralflaken (Poisson-Boltzmann-fördelning). Beräkningsmetoden anses allmänt underskatta joncondensationen vid mineralytorna för tvåvärda joner, vilket i sin tur leder till att trycksänkningen överskattas.

SKB anser att det är viktigt att säkerställa en riktig konceptuell bild och avser därför att fortsätta med mer avancerade modelleringsverktyg för att beskriva kalciumdominerade system. Fördjupade analytiska modeller för beräkning av de laddningskompenserande jonernas fördelning finns inom ytkemin. Användbarheten hos dessa kommer att studeras. Laddningsfördelningen kommer även att studeras med hjälp av molekylärdynamik.

24.2.15 Jonbyte/sorption

I smektit upprätthålls elektrisk neutralitet genom att positivt laddade motjoner i porvattnet kompenserar de enskilda negativt laddade mineralflaken, se även 24.2.14 och 24.2.17. Motjonerna är relativt svagt bundna till mineralytorna och har en viss mobilitet vilket leder till att systemet strävar efter att stå i jämvikt med en yttre lösning, se 24.2.14. Vilka joner som finns i porvattnet vid jämvikt och i vilken utsträckning de förekommer, kommer alltså att vara beroende av bland annat grundvattenkemin och vilka övriga mineral som finns tillgängliga i bentoniten. Omfördelning av motjoner kallas jonbyte och är exempel på en sorptionsprocess. Olika typer av motjoner binder olika hårt till ytorna och hydratiseras olika starkt beroende på storlek och laddning. Detta innebär att bentoniter med olika motjonsfördelningar kommer att ha delvis olika fysikaliska egenskaper, till exempel svälltryck och svällbarhet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB konstaterade att jonbyte från natrium till kalcium, eller tvärtom, inte påverkar buffertens tätningsegenskaper för de undersökta naturliga natriumdominerade respektive kalciumdominerade bentoniterna. Svällningspotentialen är emellertid betydligt lägre för kalciumdominerade bentoniter, vilket leder till lägre svälltryck och högre hydraulisk konduktivitet vid låga densiteter.

SKI påtalade att Milosbentonitens tätningsegenskaper behöver undersökas ytterligare.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Laboratorieundersökningar har genomförts på ett antal bentoniter som jonbytt fullständigt till både natrium, kalcium, magnesium och kalium /24-3/. I denna studie fann man skillnader i svälltryckets densitetsberoende för olika motjoner. Skillnaden är speciellt uttalad mellan en- och tvåvärda joner vid lägre densiteter (under buffertdensitet).

Lot-paket A2, vilket avslutades och analyserades under 2006, se avsnitt 24.2.6, har gett ett omfattande material för såväl isothermala förhållanden som kraftiga temperaturgradienter. Bland annat noterar man ett visst upptag av koppar(II)joner i utbytesposition. Denna koppar härstammar från instrumenteringsrör och från den simulerade bränslekapseln. En jämförelse med tidigare brutna

Lot-paket (ettårsförsök) visar dock att mängden jonbytt koppar inte ökar med tiden. Den frigjorda kopparn härstammar alltså från initiala, aeroba korrosionsprocesser.

En generell geokemisk modellering av ett KBS-3-deponeringshål /24-26/ har beaktat jonbytesprocesserna och dess koppling till masstransport i bufferten och i kringliggande grundvatten. Effekten av grundvatten med olika joninnehåll har kvantifierats.

Program

Effekten av tvåvärda joner (kalcium) på svällningen behöver utredas i detalj både för buffertdensitet och för dispergerade system. Laboratieförsök och direkta mätningar (till exempel med Saxe), analytiska lösningar samt molekylärdynamik är tänkbare metoder.

Kvantifieringen av processerna behöver hanteras på ett sätt som konceptuellt stämmer överens med bilden av montmorillonit från ett ytkemiskt perspektiv. En sådan hantering har också påbörjats. Ytterligare insatser med såväl laboratorieundersökningar och modellering bör genomföras.

24.2.16 Montmorillonitomvandling

De önskvärda fysikaliska egenskaperna hos bufferten, främst svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, beror på samverkan mellan vatten och montmorillonitmineralet i bentoniten. Denna samverkan påverkas av ändringar i jonkoncentrationen i grundvattnet och av ändringar i montmorillonitens mineralstruktur, se avsnitt 24.2.15. Den mineralogiska stabiliteten hos montmorilloniten har därför avgörande betydelse för buffertens funktion.

Montmorillonit kan vara stabil i hundratals miljoner år i sin bildningsmiljö, men förändringar i den geokemiska miljön kan leda till en relativt snabb förändring av mineralstrukturen, se avsnitt 24.1.11.

I naturen förekommer mineral med likartad struktur, men med stora skillnader i flakladdning. Om laddningen är nära noll, till exempel i pyrofyllit, är samverkan med vatten obetydlig. Detta ger radikalt andra egenskaper än hos montmorillonit. En något större flakladdning och därmed fler balanserande katjoner leder till större samverkan med vatten. Är flakladdningen tillräckligt stor kommer dock jonerna att fixeras till mineralflaken med en minskad samverkan med vatten som följd. Slutmineralet i en sådan serie är glimmermineral. De typiska egenskaperna hos montmorilloniten är således en följd av en medelhög flakladdning.

Fixeringen av laddningsbalanserande joner beror till hög grad av jonens egenskaper. Kaliumjoner binds till exempel vid lägre flakladdning än natriumjoner, som i sin tur binds vid lägre laddning än kalciumjoner. Illit avser material med en flakladdning mellan den hos montmorillonit och glimmer. Kaliumjoner fixeras till viss del i en illitlera, men det gör inte natrium- eller kalciumjoner. Fixering av flervärda joner, vanligen järn eller magnesium, kan även ske via en brygga av hydroxid, vilket ger ett kloritmineral.

För att en montmorillonit ska omvandlas i riktning mot illit eller klorit krävs således en ökning av flakladdningen, vilket kan ske bland annat genom frigörelse av kisel, utbyte av aluminium och förändring av valens i strukturen (järn).

Vid en eventuell omvandling kan sekundära processer ha betydelse för buffertens funktion. Frigörelse av kisel skulle sannolikt leda till utfällningar av olika kiselmineral, vilka kan påverka buffertens reologiska egenskaper (cementering), se avsnitt 24.2.9.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Sådana pH-förhållanden som är karakteristiska för portlandcement (pH mellan 13 och 14) medför en snabb upplösning av montmorilloniten i bentonit, varvid framför allt kisel frigörs.

Laboratieförsök med naturliga material med lägre kvalitet än kommersiella bentoniter bör genomföras.

SKB planerade att studera förändringar av buffertegenskaperna som följd av reaktioner med järn.

Följande synpunkter har framfördes vid granskningen:

- SKI ville ha svar på frågan om kemiska omvandlingar kan ge heterogenitet i bufferten och anser det angeläget att visa att en initial cementering och/eller omvandling till icke-svällande lermineral inte påtagligt försämrar buffertens egenskaper.
- SKB behövde ta ställning till om cement måste undvikas eller begränsas i närområdet kring buffert och kapsel.
- SKI befarade en partiell omvandling av bufferten som skulle kunna försämma egenskaperna.
- Det vore värdefullt om SKB mera detaljerat redovisade förväntade resultat från pågående långtidsförsök.
- SKI saknade en redovisning av hur kemiska processer ska integreras i arbetet med kopplade processer.
- SKI efterlyste modellering av förlopp som skulle kunna påverka buffertens homogenitet och svällande egenskaper, till exempel eventuella förändringar av buffertens mekaniska och hydrauliska egenskaper nära kapseln och i gränssytan mot berget på grund av kemiska omvandlingar.
- Kasam ansåg att konsekvenserna av en begränsad illitisering bör undersökas.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

SKB har genomfört en laboratoriestudie /24-27/ där bentonit utsatts för pH-förhållanden motsvarande de i portlandcement. Studien visar på en relativt snabb inkongruent upplösning av bentoniten.

Litteratordata för montmorillonitstabilitet har sammanställts med avseende på processer och kvantitativa modeller. Jämförande beräkningar för befintliga modeller har genomförts /24-28/.

Flera oberoende laboratorieanalyser har utförts på material från Lot-försök A2, se avsnitt 24.2.6, med avseende på mineralogiska förändringar hos montmorilloniten.

Studier av metalliskt järn i kontakt med vattenmättad bentonit under anaeroba förhållanden har påvisat en korrosionsprocess där järn i viss utsträckning tas upp i lermatrisen och förändrar denna i stället för att forma stabila korrosionsprodukter på metallens yta /24-29/. I vissa fall har man konstaterat en direkt omvandling av smektiten till icke-svällande järnrika lerfaser /24-30/.

Program

En laboratoriestudie i samarbete med Nagra kommer att genomföras. Huvudsyftet är att verifiera de modeller och parametervärden som SKB använder för montmorillonitombildning.

Försökspaket S2 i Lotserien vid Äspölaboratoriet kommer att avslutas och analyseras i enlighet med analysprogrammet för A2-försöket, se avsnitt 24.2.6. Det redan analyserade A2-försöket genomfördes vid accelererande förhållanden, det vill säga med förhöjd temperatur och med lokala tillsatser. S2-försöket genomförs däremot med så buffertlika förhållanden som möjligt.

Geokemisk modellering planeras inom Lot-projektet, där specifikt montmorillonitens stabilitet tas i beaktande.

Fortsatta analyser av Lot-paket genomförs. Geokemisk modellering planeras inom Lot-projektet, inom Äspö Task Force EBS.

När det gäller järn kopplat till montmorillonitombildning är det relevant att studera både påverkan av järn i dess olika former (metalliskt eller joniskt) samt hur strukturellt järn i montmorilloniten påverkar dess egenskaper. Metalliskt järn kan fungera som ett reduktionsmedel och strukturellt järn är redoxaktivt, vilket gör det sannolikt att dessa faktorer kan samspela. Exempel på pågående arbete inom SKB som belyser båda dessa aspekter är fältförsöket "Alternativa buffertmaterial". I försöket utsätts 13 olika buffertmaterial med varierande halt strukturellt järn för en cirka 130 °C varm järnkapsel.

24.2.17 Lösning/fällning föroreningar

Den del av buffertmaterialet som inte utgörs av montmorillonit består av andra vanliga mineral, till exempel kvarts, fältspater, gips, kalcit, samt små mängder organiskt material. De sekundära mineralen räknas här till materialets föroreningar, då de inte bidrar till buffertens tätande egenskaper. I förvarsmiljön kan mineralen lösas upp och ibland åter fällas ut beroende på vilka förhållanden som råder. Denna mineralomfördelning kan förändra buffertens tätande egenskaper, samt de reologiska egenskaperna så att materialet blir sprödare och mer hållfast (cementering). Lösning och fällning av föroreningar påverkar även jonbytes- och sorptionsprocesserna, se avsnitt 24.2.15, genom att den lokala porvattenkemin påverkas.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

De pågående långtidsförsöken inom Lot-projektet förväntas ge svar på frågan om utfällningarna beror på förångning av inkommande vatten under vattenmättnadsfasen, eller om processen fortgår även efter full vattenmättnad.

Följande synpunkter framfördes vid granskningen:

- Mer arbete krävs för att undersöka föroreningar och accessoriska mineral. För samtliga förekommande komponenter krävs en kvalitativ redovisning av på vilket sätt de kan påverka den långsiktiga säkerheten.
- SKI ville ha svar på frågan om kemiska omvandlingar kan ge heterogenitet i bufferten och anser det angeläget att visa att en initial cementering och/eller omvandling till icke-svällande lermineral inte påtagligt försämrar buffertens egenskaper.
- SKB kan behöva använda bentonitmodeller som tar hänsyn till termodynamiska egenskaper för komplexa lermineral.
- SKI saknade en redovisning av hur kemiska processer ska integreras i arbetet med kopplade processer.
- SKI saknade en beskrivning över modellverktygen som hanterar kemiska processer, till exempel utfällningsreaktioner drivna av temperaturgradienten.
- SKI efterlyste modellering av förlopp som skulle kunna påverka buffertens homogenitet och svällande egenskaper, till exempel eventuella förändringar av buffertens mekaniska och hydrauliska egenskaper nära kapseln och i gränsytan mot berget på grund av kemiska omvandlingar.
- SSI påpekade att analogier kan vara ett sätt att studera cementering.
- Kasam ansåg att SKB bör föreslå gränsvärden för föroreningshalter i bentonitbufferten.
- Kasam ansåg också att buffertens funktion som en följd av kombinationer av föroreningar bör utredas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Under 2006 har försökspaket A2, se avsnitt 24.2.6, inom Lot-projektet brutits och analyserats. Bentoniten var fullt vattenmättad och en mindre omfördelning framför allt av sulfatmineral (gips, anhydrit) observerades. De delar av buffertmaterialet som varit utsatt för höga temperaturer (130–80 °C) visade en liten men säkerställd cementering.

SKB har genomfört en generell modellering av den geokemiska utvecklingen i ett deponeringshål enligt KBS-3V /24-1/. Resultaten visar på en omfördelning av både kisel- och sulfatmineral under påverkan av den termiska gradienten. Kisel fälls ut i de yttre, svalare delarna av bufferten, medan anhydrit anrikas närmast kapselytan.

Program

Försökspaket S2 i Lotserien i Äspölaboratoriet kommer att avslutas och analyseras i likhet med analysprogrammet för A2-försöket, se avsnitt 24.2.6. I S2-försöket har buffertmaterial varit utsatt för KBS-3-förhållanden, det vill säga utan förhöjda temperaturer eller tillsatta kemikalier.

Merparten av lösning/fällning-processerna är i sig väl kända och kan modelleras för mindre komplicerade system. Vissa transport- och reaktionsmekanismer, vilka är specifika för bentonitmaterial, är emellertid inte helt klarlagda. I anslutning till Lot-projektet har därför ett program initierats, med syfte att genomföra geokemisk modellering av fältförsöken med delvis nya simuleringsverktyg. Programmet har även som mål att öka den konceptuella förståelsen av processerna i bentonitporvatten.

24.2.18 Kolloidfrigörelse/erosion

Bufferten och återfyllnaden i ett KBS-3-förvar består till största delen av mikroskopiska smektitpartiklar. Under vattenmättnaden kommer partiklarna i de högkompakterade blocken att utsättas för mycket starka repulsiva krafter. Detta medför att bufferten sväller och att de tomma utrymmena i deponeringshålen fylls upp. Bufferten kan också svälla korta sträckor in i sprickorna i deponeringshålets väggar. Vatten som strömmar i sprickorna skulle kunna skjuva av de yttersta partiklarna och frilägga nya partiklar för det strömmande vattnet. Detta problem förstärks om vattnet har mycket låg jonstyrka.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att SKB i första hand ska utreda om buffererosion och kanalbildning är ett problem i referenskonceptet KBS-3V, speciellt effekten av glacialt grundvatten.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Det går i dag inte att utesluta att grundvattnet i Forsmark och Laxemar kan komma att ha mycket låga salthalter efter en glaciation. Detta kan medföra att bentoniten bildar kolloider och eroderas bort.

Den mycket grova modell som användes i SR-Can visade att mycket stora mängder buffert skulle kunna försvinna. Det är uppenbart att det är nödvändigt att ha ett bättre underlag och förståelse för erosionprocessen inför SR-Site.

Fram till december 2006 har tre olika typer av experiment genomförts inom bentoniterosionsprojektet.

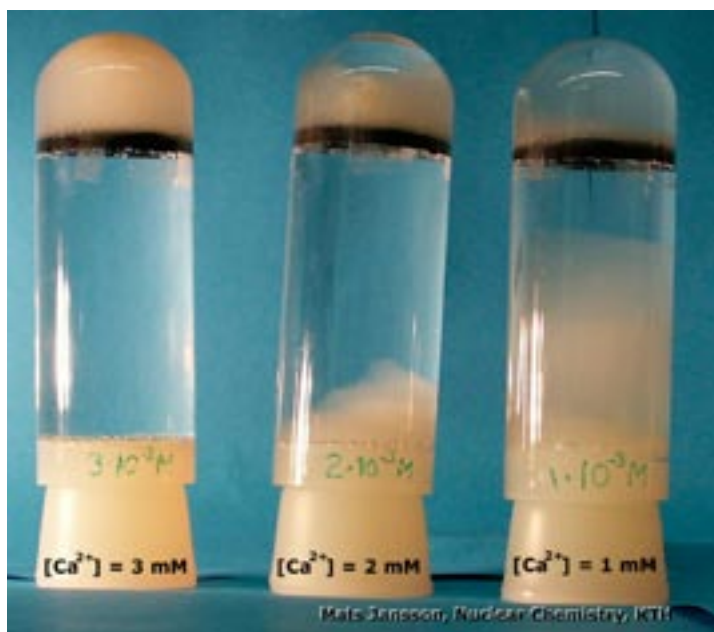
Ett antal försök har utförts för att studera hur jonstyrka och gravitation påverkar en bentonitlösningsstabilitet, se figur 24-12.

I ett annat försök studerades utvecklingen av koncentrationsprofilen vid bentonitsvällning. När försöket bröts togs prover i flaskan och en koncentrationsprofil erhöles, se figur 24-13.

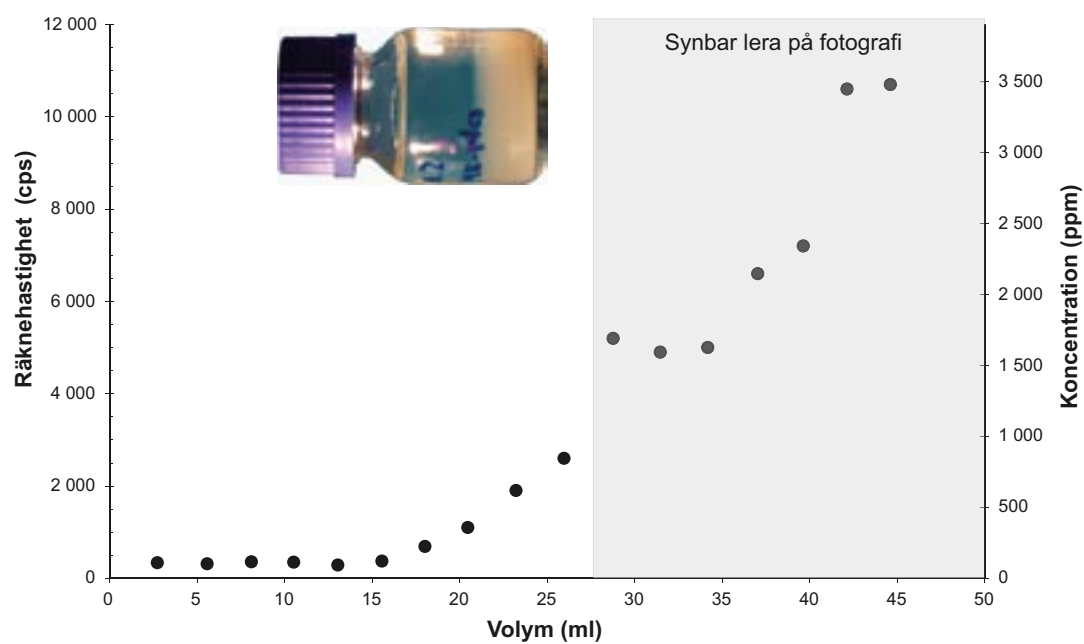
Ett långtidsförsök där bentonitsvällning/upplösning i en artificiell vattenförande spricka startades i juli 2006. Figur 24-14 ger en schematisk skiss av försöksupställningen. Figur 24-15 visar hur bentoniten expanderat ut ur behållaren och börjar dispergera in i sprickan. Ett antal liknande försök är planerade, där ren natrium- och kalciumbentonit ska användas.

Program

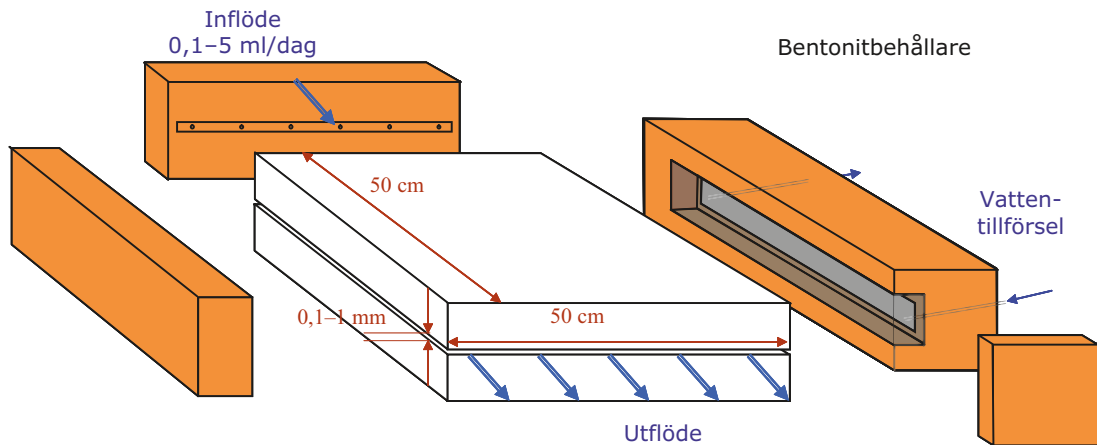
SKB har startat ett projekt (Bentonite Erosion) för att studera erosion av bentonit i utspädd vatten. Syftet med projektet är att ta fram en kvantitativ modell för att bedöma omfattningen av erosionsprocessen i säkerhetsanalysen SR-Site. Projektet kommer att pågå i två år.



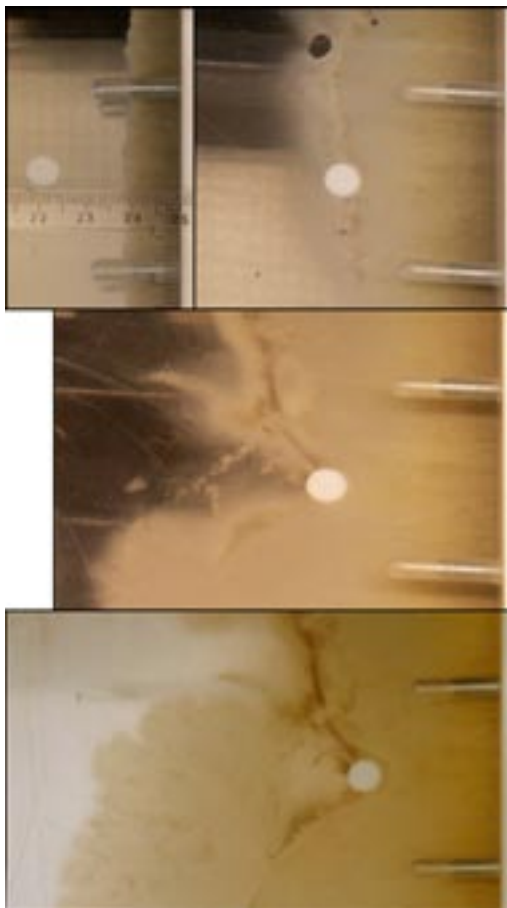
Figur 24-12. 0,1 gram natriummontmorillonit löstes i 10 milliliter destillerat vatten. Ett nät placerades ovanpå montmorillonitlösningen med en o-ring som stöd. Lösningar med varierande Ca^{2+} -koncentration tillsattes innan provröret vändes upp och ner.



Figur 24-13. Koncentrationsprofil i flaskan när försöket bröts.



Figur 24-14. Schematisk bild av försöksuppställningen. För att simulera en spricka placerades två plexiglasskivor nära varandra (1 millimeter). På en kortsida finns en bentonitbehållare. Bentoniten vattenmättades via en kanal på behållarens baksida innan destillerat vatten började pumpas genom sprickan vinkelrätt mot bentonitbehållaren.



Figur 24-15. Utvecklingen av en bentonitprofil i en del av den artificiella sprickan. Fotografiet överst till vänster är taget när bentoniten är fullt vattenmättad, innan vatten börjat pumpas genom sprickan. Överst till höger har vatten pumpats fyra veckor genom sprickan. Mittenbilden är tagen efter 18 veckors pumpning och underst har vatten pumpats genom sprickan i 27 veckor.

De olika faserna i projektet är:

1. Litteraturstudier och informationsinsamling.
2. Modellering:
 - Gel/sol-beteende och frigörelse av partiklar till grundvatten.
 - Betydelse av spricköppningar och flödesfält.
 - Molekyldynamisk modellering.
 - Reaktiv transport – särskilt Na/Ca-utbyte.
3. Experiment.
 - Permeabilitet i utspädda system.
 - Reologiska egenskaper i utspädda system.
 - Svälltryck i utspädda system.
 - ”Critical Coagulation Concentration” (CCC).
 - Katjonbyte och jonbytesprocesser.
 - Kolloidfiltrering i föroreningar.
 - Betydelse av föroreningar.
 - Flöde i sprickor.
4. Workshops.

24.2.19 Stråлиндucerad montmorillonitombvandling

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Montmorillonit i bufferten kan brytas ned av gammastrålning. Resultatet blir i så fall en minskning av montmorillonithalten. Experiment har emellertid visat att den ackumulerade stråldosen, som bentoniten kommer att utsättas för i ett slutförvar, inte orsakar några mätbara förändringar av montmorillonithalten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I /24-31/ visas att en dos av $4 \cdot 10^{18}$ alfapartiklar per gram bentonit förstör materialet totalt. Enligt radionuklidtransportberäkningarna i SR 97 /24-32/ uppnås det totala alfasönderfallet $4 \cdot 10^{18}$ sönderfall per gram först efter en miljon år och endast i bufferten närmast en skadad kapsel. Slutsatsen i SR-Can var att processen är oväsentlig för förvarets säkerhet. Slutsatsen kvarstår, men den ursprungliga referensen för effekten av alfastrålning på bentonit kan inte sägas ha den kvalitet som krävs för SR-Site.

Program

I första hand kommer därför den befintliga litteraturen att gås igenom för att se om det finns ett bättre underlag. Det är också möjligt att det blir nödvändigt med experiment.

24.2.20 Radiolys av porvatten

Gammastrålning som tränger genom kapseln kan sönderdela porvatten genom radiolys, varvid OH-radikaler, vätgas, syrgas och flera andra komponenter bildas. Syret förbrukas snabbt genom oxidationsprocesser som påverkar redoxpotentialen, medan vätgasen transporteras bort. Kapselns väggtjocklek är dock tillräcklig för att effekten av gammaradiolys på utsidan ska bli försumbar, se avsnitt 23.1.3.

24.2.21 Mikrobiella processer

Mikrobiella processer kan under vissa betingelser ge upphov till bildning av gaser och sulfid. Gasbildning skulle kunna ge mekaniska laster i förvaret, medan sulfid skulle kunna korrodera kopparkapseln. För att mikrobiell bildning av sulfid ska ha någon betydelse för kapselns livslängd måste den ske mycket nära kapselns yta.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKB beskrev i Fud-program 2004 studier av kopparkorrosion i alkaliskt vatten. Sedan flera år tillbaka pågår ett program för att kartlägga bakteriell korrosion av koppar. Resultaten visade att introducerade sulfatreducerande bakterier inte kunde överleva i bentonit med en densitet på 2 000 kg/cm³ /24-33 till 24-36/.

SKI uppmärksammade SKB på brister i underlaget som rör mikrobers möjlighet att överleva i bentoniten, särskilt för sulfatreducerande bakterier. SKI noterade att vissa egenskaper hos bufferten, till exempel förekomst av mikrobiell aktivitet, formulerats som önskemål snarare än krav och undrar om detta innebär att sådana egenskaper kommer att ges större tyngd i säkerhetsanalysen. Detta gäller till exempel är analysen av betydelsen av mikrobiell aktivitet i bufferten för kopparkorrosion. I takt med att kännedomen om mikrobers överlevnadsförmåga utökas tyckte SKI att det blir allt svårare att utesluta mikrobiell aktivitet genom miljöfaktorer. SKI ansåg att det därför är nödvändigt att i säkerhetsanalyserna visa på effekterna av mikrobiell aktivitet. Med fallet kopparkorrosion är det därför inte tillräckligt att studera processerna i huvuddelen av bentoniten, utan även gränsskiktprocesser behöver analyseras, till exempel möjligheten att det finns biofilm på kapselns yta.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

I forskningsunderlaget inför Fud-program 2004 /24-33 till 24-36/ hade huvudsakligen stammar av bakterier från laboratoriet utnyttjats, vilket fått kritik eftersom naturligt förekommande bakterier allmänt kan anses mer överlevnadsdugliga än laboriestammar. Forskningen har sedan Fud-program 2004 därför inriktats på att studera naturligt förekommande bakterier. Det är sedan länge visat, men inte allmänt känt, att leror är utmärkta konserveringsmedel för bakterier. Innan frystorkning blev standard lagrade forskare bakterier i torkad lera. Nya resultat visar att kommersiell bentonit, i detta fall MX-80, innehåller sulfatreducerande bakterier. Ett exempel är *Desulfovibrio africanus*, som har hög temperatur och salttolerans /24-37/. En närmare undersökning av DNA-innehållet i detta buffertmaterial har påvisat att ett stort antal olika mikrobiella DNA-signaturer förekommer med en tydlig dominans av Gram-positiva bakterier /24-38/. Det är således klarlagt att buffert och återfyllning av MX-80 kommer att innehålla ett stort antal olika bakterier (inklusive sulfatreducerande bakterier) som aktiveras när bentoniten tar upp vatten.

Utforskningen av mikrobiellt liv i djupa grundvatten har pågått sedan 1987 och har lett fram till en hypotes där vätgas har en central betydelse som energikälla och elektrondonator /24-39/. Nya försök på Äspölaboratoriet har visat att vätgas ökar den mikrobiella bildningshastigheten av acetat och sulfid. Dessa processer är kopplade, men utförs av olika bakteriegrupper. Maximal sulfidbildningshastighet med tillskott av vätgas under naturliga förhållanden på 450 meters djup var 0,14 milligram sulfid per dygn. Systemen nådde drygt 7 milligram sulfid per liter efter 100 dagar. Det är uppenbart att sulfid kan bildas snabbt av bakterier på förvarsdjup och att koncentrationen kan bli hög under optimala förhållanden, särskilt under förhållanden med hög vätgashalt, till exempel från korrosion av järn. Dessa resultat var nya när fullskalförsöket Lot-försöket och Återtagningsförsöket bröts under 2006. Undersökningarna av dessa buffertmaterial visade att acetat och sulfidbildande bakterier fanns allmänt i bufferten vid en densitet som tangerar 1 900 kg/cm³. Omättad buffert i Återtagningsförsöket med en densitet strax över 2 000 kg/cm³ innehöll också levande acetat och sulfidbildande bakterier. Vid en kombination av hög temperatur, en densitet på 2 000 kg/cm³, fullt svälltryck och full vattenmättnad kunde bakterier dock, med enstaka undantag, inte påvisas.

Program

Bildning av kopparsulfid på kopparytor i bentonit med olika svälltryck har studerats under naturliga förhållanden och tryck på förvarsdjup i modellsystem /24-37/. Mängden bildad kopparsulfid minskade linjärt med ökande densitet. Resultaten från dessa försök stöder således gällande modell där mikrobiell aktivitet inte är möjlig vid full densitet. Nya uppföljande försök pågår där gränsvärden på densitet för mikrobiell aktivitet i bentonit ska fastställas för att kunna användas i säkerhetsanalyserna. Kvantitativa data på sulfidbildning och diffusion tas också fram, så att säkerhetsanalyserna kan inkludera mikrobiell aktivitet, i stället för att som tidigare utesluta mikrobiell sulfidbildning baserat på miljöfaktorer.

Undersökningar av mikrobeförekomst fortsätter vid kommande brytningar av försök i Lot-serien.

24.2.22 Radionuklidtransport – advektion

Buffertens huvuduppgift är att garantera att diffusion är den dominerande transportmekanismen runt kapslarna. Med en MX-80-buffert med en vattenmättad densitet av 2 000 kg/m³ är transportkapaciteten för diffusion minst 10 000 gånger högre än den för advektion.

I SR-Can beräknas även radionuklidtransporten för ett fall då bufferten gått förlorad och då mass-transporten domineras av advektion.

24.2.23 Radionuklidtransport – diffusion

Transporten av radionuklider genom bufferten sker med olika diffusionsmekanismer. Det är klarlagt att vissa katjoner kan ha höga diffusiviteter (transporteras effektivare).

När bentonit har så hög densitet att de elektriska dubbellagren mellan två plan överlagras uppträder ett fenomen kallat anjonexklusion. Anjoner kan inte tränga in i de interlamellära porerna på grund av de elektrostatiske krafterna mellan de negativt laddade ytorna och anjonen. Anjonexklusion minskar avsevärt den tillgängliga porositeten för diffusion av anjoner. Vid höga salthalter blir effekten av anjonexklusion mindre och i blandningar av bergkross och bentonit är den försumbar.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att SKB har ett bra program för att studera radionuklidmigration i bufferten och att ytterligare förbättra förståelsen av ytdiffusion, anjonexklusion och komplexbildning med organiska ämnen bör vara en riktig prioritering.

Kasam ansåg att en övergripande termodynamisk modell för transport (diffusion) av de viktigaste radionukliderna (till exempel radionuklider av elementen cesium och jod) genom bentonit bör upprättas.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Som en del av SR-Can har en rapport som beskriver diffusion och sorption av radionuklider i bentonit tagits fram /24-40/. Den behandlar framtagningen och urvalet av transportparametrar för radionuklider i en buffert av MX-80-bentonit. Rekommenderade värden för följande parametrar tillsammans med tillhörande osäkerheter har tagits fram och dokumenterats för 38 grundämnen och oxidationstal:

- porositet (tillgänglig för diffusion) (ϵ),
- effektiv diffusivitet (D_e),
- distributionskoefficienter (K_d).

På grund av det sätt som dessa parametrar styrs av omgivningsfaktorer, särskilt K_d , har de bestämts specifikt för de förhållanden som förväntas vara relevanta för konsekvensberäkningar i säkerhetsredovisningen. K_d -värden har normalt bestämts från givna porvattensammansättningar och fast fas/vätska-förhållanden, vilka är representativa för MX-80 kompakterad till 1 590 kg/m³ torrdensitet. För K_d har detta gjorts för ett flertal porvattensammansättningar för att reflektera variationer hos de geokemiska randvillkoren. D_e och ϵ har tagits fram som en funktion av densitet. Parametervälet har baserats på systematiska publicerade datasammanställningar och/eller på termodynamiska modeller. Osäkerheterna i parametrarna har bedömts för givna förhållanden/randvillkor från säkerhetsredovisningen och presenteras som en funktion av variabiliteten i dessa förhållanden.

Slutligen har den apparenta diffusiviteten (D_a) beräknats med de framtagna parametrarna och jämförts med oberoende experimentella resultat för att testa att parametrarna är internt konsistenta.

Program

I dagsläget ser det ut som om data för sorption och diffusion från /24-40/ kommer att vara tillräckligt för SR-Site. Det är dock möjligt att några data kommer att uppdateras om ny kunskap kommer fram.

SKB har startat ett projekt för att verifiera modellen för masstransport mellan bufferten och det strömmande vattnet i en spricka i berget. Syftet är att i laboratorieskala studera transport av radioaktiva spårämnen mellan bentonit och strömmande vatten i en konstjord spricka.

24.2.24 Radionuklidtransport – sorption

Ytan på smektitiska leror har en permanent negativ laddning. Obalansen i laddning neutraliseras av utbytbara katjoner mellan flaken. När leran är vattenmättad, hydratiseras de utbytbara katjonerna och ett elektriskt dubbellager bildas i gränsskiktet mellan vatten och lera. De laddningskompenenserande katjonerna kan lätt bytas mot andra katjoner från den lösning som är i kontakt med leran. Sorptionen av katjoner i smektitmineral kan beskrivas som jonbytesreaktioner och modelleras med termodynamiska jämviktskonstanter eller selektivitetskoefficienter. Jonbyte är den typiska sorptionsmekanismen för alkali- och alkaliska jordartsmetaller. Även många övergångsmetaller sorberas genom jonbyte.

Radionuklider kan också sorberas genom reaktioner med ytan och bilda ytkomplex. De flesta aktinider och lantanider bildar ytkomplex. Nuklider sorberade som ytkomplex kan inte transporteras med ytdiffusion.

SKB anser inte att sorption i bentonit är ett prioriterat forskningsområde. Inför varje ny säkerhetsredovisning kommer dock befintligt material att uppdateras med ny information.

24.2.25 Speciering av radionuklider

Specieringen av radionukliderna har betydelse för sorptionen och diffusionen i bufferten. Den påverkas av vilken speciering nukliden hade vid randen till bufferten, det vill säga inuti kapseln, men också av de kemiska förhållandena i bufferten. Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 22.2.14.

24.2.26 Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit

Bufferten ska förhindra att kolloider och radionuklider tränger ut från en skadad kapsel.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

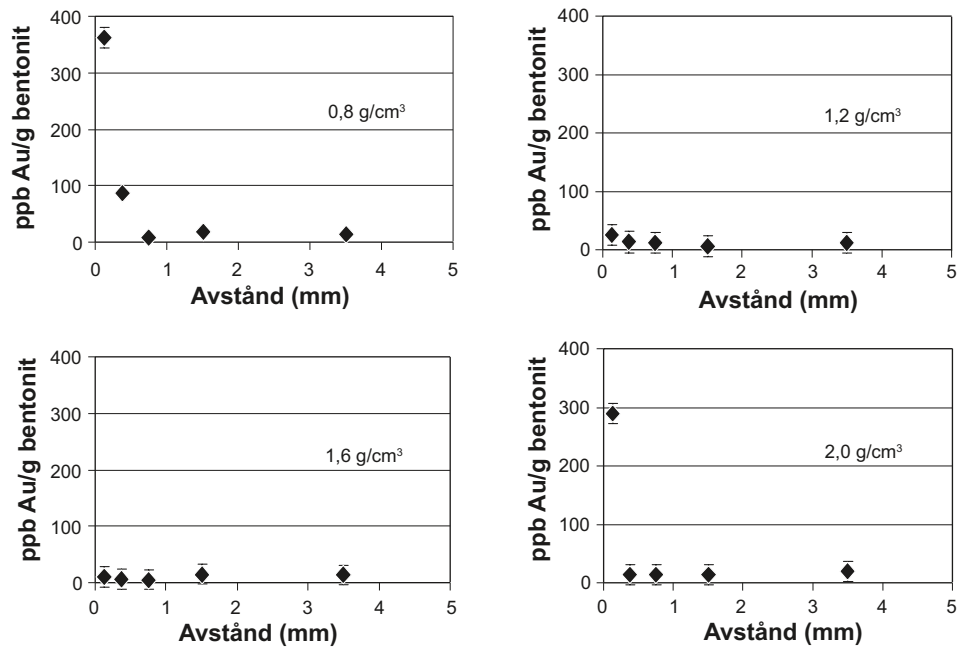
I Fud-program 2004 avrapporterades att organiska kolloider kan diffundera genom bentonit. I SR-Can förutsattes dock att oorganiska kolloider filtreras av bufferten om den mättade densiteten överstiger 1 650 kg/m³. Detta värde var baserat på japanska studier med guldkolloider.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

För att verifiera dessa slutsatser har SKB drivit ett projekt med transport av oorganiska kolloider genom bentonit. Kolloidfiltrering i kompakterad bentonit studeras för att undersöka om kolloider effektivt filtreras av bentonit kompakterad till motsvarande torrdensiteter relevanta för slutförvaret, samt för att studera vilka faktorer som begränsar kolloiddiffusionen. Ett underliggande syfte är också att studera om oorganiska och organiska kolloider har olika diffusionsegenskaper. Tidigare experimentella studier visar att små organiska humuskolloider kan diffundera genom kompakterad bentonit, samt att dessa ökar transporten av radionuklider med stark sorption till bentonit. Guldkolloider filtrerades effektivt av kompakterad bentonit. I bentonit med lägre täthet (1,0 g/cm³) sker viss transport av guldkolloiderna, dock mycket långsamt, se figur 24-16. Slutsatsen är att de förutsättningar som används i SR-Can är giltiga.

Program

För att studera om det finns en specifik filtreringsgräns för kolloider studeras nu kolloiddiffusion av guldkolloider med en diameter på 5 nanometer. Möjlighet finns att utföra motsvarande diffusionsförsök med guldkolloider med en diameter på 2 nanometer, samt med andra biologiska eller organiska partiklar med mindre diametrar.



Figur 24-16. Koncentrationsprofiler av guld i de kompakterade bentonitpelletar som användes i diffusionsförsöket. Det höga värdet i första datapunkten i diagram 2,0 g/cm³, är förmodligen resultat av kontaminering, eftersom svälltrycket vid den höga torrdensteteten fick metallfiltret att deformeras.

25 Återfyllning

Återfyllningen i tunnlarna är ingen barriär i sig själv i KBS-3-konceptet. Den är däremot nödvändig för att bufferten och berget ska få önskad funktion. De krav som ställs på återfyllningen är:

- Återfyllningen ska ha en styvhet som minimerar buffertens expansion uppåt. Därigenom bibehålls buffertens densitet.
- Återfyllningen ska ha en hydraulisk konduktivitet som gör masstransportförmågan jämförbar med den i det omgivande berget. Deponeringstunnlarna kan annars utgöra konduktiva vägar som påverkar vattenomsättningen i förvaret.
- Återfyllningen ska uppnå ett visst svälltryck mot taket för att bibehålla en svällförmåga som kan täta eventuella effekter av kanalbildning och kryprorelser i återfyllningen.

Återfyllningen får inte ha någon negativ påverkan på barriärerna i förvaret, vilket ställer en del krav på den kemiska sammansättningen.

25.1 Initialtillstånd för återfyllningen

25.1.1 Variabler

För att beskriva återfyllningen används i stort sett samma variabler som för bufferten, se tabell 24-1.

25.1.2 Geometri

Återfyllningens mått ges av måtten hos tunnlarna.

25.1.3 Porgeometri

Den initiala porgeometrin (porositeten) hos återfyllningen följer trivalt av dess materialspecifikation.

25.1.4 Strålintensitet

Den initiala strålintensiteten i återfyllningen är försumbar.

25.1.5 Temperatur

En bestämning av den initiala temperaturen i återfyllningen är trivial. Denna kommer att vara nära bergets initiala temperatur.

25.1.6 Vattenhalt

Den initiala vattenhalten i återfyllningen följer trivalt av dess materialspecifikationer. Det är en parameter som kan kontrolleras vid blandningen av materialet.

25.1.7 Gashalter

Den initiala gashalten i återfyllningen följer trivalt av dess specifikationer.

25.1.8 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gstryck. Initialt är det relevant att beskriva gas- och vattentryck. Flöden förekommer inte initialt i återfyllningen. Vid inplaceringen är förvaret öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gstryck (luft) av en atmosfär (cirka 0,1 MPa) och

ett vattentryck av 0–0,1 MPa i omgivningen. Däremot kommer det, liksom hos bufferten, att finnas ett initalt porvattenundertryck i den omättade återfyllningen. Undertrycket driver intransporten av vatten tillsammans med övertrycket från vattnet i berget. Detta porundertryck beror av vilket koncept som väljs.

25.1.9 Lastsituation

Svälltrycket börjar utbildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med externt vatten. Initialt finns inget svälltryck.

25.1.10 Återfyllningssammansättning

Mängden och sammansättningen av föroreningar beror till största delen på vilket återfyllningskoncept som väljs. För varje koncept måste konsekvenserna av dessa föroreningar utvärderas. Se avsnitt 25.2.2.

25.1.11 Montmorillonitsammansättning

Se avsnitt 25.2.2.

25.1.12 Porvattensammansättning

Vattnet i återfyllningen är en blandning av bentonitens ursprungliga vatten samt vatten som tillsätts vid blandningen. Dess sammansättning beror till största delen av vilket vatten som tillförs.

25.1.13 Konstruktionsmaterial

Se avsnitt 24.2.16 (järn och cement).

25.2 Processer i återfyllningen

25.2.1 Översikt av processer

I återfyllningen sker i princip samma processer som i bufferten, dock ibland i en annan omfattning. Dessutom spelar det eventuella bergkrosset (definierat som förorening i återfyllningen) en delvis annan roll än buffertens föroreningar, bland annat genom att bidra till sorptionen. I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i återfyllningen.

25.2.2 Integrerade studier – sammansättning och funktion

Återfyllningens egenskaper bestäms, förutom av sammansättningen, av densiteten och av grundvattnets salthalt. SKB driver tillsammans med Posiva ett utvecklingsprojekt där olika återfyllningskoncept utvecklas och jämförs mot ställda krav. Ett återfyllningskoncept definieras av sammansättningen av återfyllningsmaterialet samt av installationsmetoden som bestämmer vilken densitet som kan uppnås. Återfyllningens exakta sammansättning, samt krav på densitet, kommer att väljas när nödvändiga data finns tillgängliga från den aktuella platsen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Projektet ”Återfyllning och förslutning av tunnlar och bergrum” har som mål att utveckla material och tekniker för återfyllning och förslutning av ett slutförvar för använt kärnbränsle av typ KBS-3. Slutsatsen från Fas 1 av projektet var att återfyllningskonceptet där material packas på plats i tunneln och konceptet där förtryckta block och pelletar placeras i tunneln skulle utredas vidare.

SKI drog liksom SKB slutsatsen att ren bergkross utesluts som återfyllning i deponeringstunnlar, medan alternativet med blandningen bentonit och bergkross 30/70 behöver utredas ytterligare.

SKI stödde även SKB:s planer att utreda alternativen Friedlandlera och kompakterade block. Också SSI kommenterade att det är bra att SKB intensifierat sitt forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för att få fram ett fungerande koncept för att återfylla tunnlarna.

SKI påpekade i sin granskning att SKB inför kommande ansökningar bör presentera ett koncept för återfyllning av tunnlar, vilket uppfyller kraven som ställs på slutförvarets funktion.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Inom projektet Baclo har olika kombinationer av material och installationsmetoder utretts och jämförts mot de funktionsindikatorer som uttryckts i SR-Can. Slutsatserna från detta arbete är att installation av förtryckta block och pelletar av bentonitliknande material och bentonit med låg smekthalt ger störst marginal till funktionsindikatorerna. Detta arbete beskrivs närmare i del III, kapitel 15.

Flödestesterna som gjorts i Backfill and Plug Test indikerar att den hydrauliska konduktiviteten i återfyllningen är högre än funktionsindikatorn 10^{-10} meter per sekund.

Program

Arbetet inom projektet Baclo kommer att fokuseras på kanalbildning och erosion under återfyllningsoperationen, se vidare del III, kapitel 15. Även processen för läkning av eventuella kanaler samt vattenmättnad och homogenisering av återfyllnaden kommer att undersökas.

Inom projektet Backfill and Plug Test så kommer deformationsegenskaperna i återfyllningen att testas in situ.

25.2.3 Stråldämpning/värmealstring

Processen kan försummas i återfyllningen.

25.2.4 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Återfyllningens värmetransportegenskaper konstaterades ha en liten betydelse för temperaturutvecklingen i närfältet.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Nya beräkningar /25-1/ bekräftar att återfyllningens värmetransportegenskaper (inom tidigare antagna intervall) inte har mer än försumbar betydelse för kapseltemperaturen. Detta gäller även för den variabel som avgör förvarets dimensioner, nämligen bentonitens maxtemperatur vid kapselns basytor i torra deponeringshål (jämför figur 24-2 i kapitel 24).

Program

Värmeledningsegenskaperna hos de nya återfyllningsmaterial som efterhand aktualiseras bestäms och/eller uppskattas. Slutsatsen att värmetransportegenskaper inte har någon stor betydelse för kapseltemperaturen kontrolleras genom beräkningar.

25.2.5 Frysning

Se avsnitt 24.2.4 om frysning i bufferten. Det är i grunden samma process som sker i återfyllningen när materialet fryser. Skillnaden är att den specifika ytan hos de föreslagna återfyllningsmaterialen är mindre (och temperaturen således högre) då allt vatten börjar frysa. I tunnlar och schakt ovanför förvarsnivån kan dessutom temperaturerna bli lägre. Frysning av vattnet i återfyllningen kan alltså inte uteslutas.

Frysning av återfyllning är inte behandlat i Fud-program 2004. Någon specifik forskning har inte heller bedrivits på detta område, utom för angränsande geotekniska tillämpningar. Däremot finns processen med i SR-Can. Där konstateras att frågan om frysning kan inträffa i återfyllningen på förvaringsnivå är viktig och att separata studier av när frysning inträffar och konsekvenserna av detta ska genomföras för både buffert och återfyllning.

Både teoretiska och laborativa studier av frysning ska genomföras och de långsiktiga konsekvenserna för dessa material undersöks. Följande planeras:

- Teoretiska studier av frysmekanismen och dess konsekvenser i form av förhöjda tryck mot omgivningen.
- Laborativa studier av frysmekanismen som stöd för teorierna.
- Långsiktiga konsekvenser i form av islinnbildning, vattentransport med tillväxt av islinserna, åtföljande expansionstryck mot berget och läkning av inhomogeniteterna efter upptining ska undersökas både teoretiskt och i laboratorium.

25.2.6 Vattentransport vid omättade förhållanden

Skillnaderna i egenskaper (till exempel permeabilitet, porundertryck) hos in situ-packad 30/70-blandning, pelletar och block av till exempel Friedlandlera är mycket stora och ger stor skillnad i bevättningshastighet. Se även avsnitt 25.2.2.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Bevätningen av bufferten genom återfyllningen kan vara betydelsefull om berget runt deponeringshållet är mycket torrt. Teoretiska studier av detta planerades.

SKI ansåg att SKB, på samma sätt som för bufferten, även för återfyllningen systematiskt borde analysera de egenskaper, händelser och processer som på sikt kan leda till en försämrad funktion. Sådana långsiktiga effekter påverkar dock inte de omättade processerna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Undersökningar av återfyllningens bevätning har bedrivits främst genom modellberäkningar och genom mätningar i fältförsöken vid Äspölaboratoriet.

Modellberäkningar av vattenmättnadsförloppet i återfyllningstunnlarna och dess effekt på bevätningen av bufferten har genomförts för SR-Can /25-2/. In situ-packad 30/70-blandning och in situ-packad Friedlandlera användes som återfyllningsmaterial. De viktigaste slutsatserna från beräkningarna var följande:

- Tiden till total mättnad varierar från 0,5 år för 30/70-återfyllningen med en meter mellan sprickorna till mer än 150 år för Friedlandlera med 25 meter mellan sprickorna.
- Återfyllningsmaterialets påverkan på bevätningstakten är ganska stor beroende på skillnaden i hydraulisk konduktivitet hos de olika typerna av återfyllningsmaterial, vilket tycks vara den egenskap som kontrollerar bevättningshastigheten. Skillnaden i tid för att uppnå full vattenmättnad hos Friedlandlera är cirka tio gånger längre än för 30/70-återfyllningen om spricktransmissiviteten är tillräckligt hög (större än 10^{-10} m²/s).
- Påverkan av sprickfrekvens är stor eftersom väldigt lite vatten transporteras i bergmatrisen vid en hydraulisk konduktivitet på 10^{-13} meter per sekund. Tiden för att uppnå full vattenmättnad är nästan proportionell mot sprickavståndet.
- Påverkan av transmissiviteten är obetydlig, förutom vid en kombination av lägsta transmissivitet (10^{-11} m²/s) och 30/70-återfyllning, eftersom transmissiviteten är tillräckligt hög jämfört med den hydrauliska konduktiviteten i återfyllningen för att ge ett högt vattentryck i gränssytan mellan sprickan och återfyllningen och eftersom inflödet av vatten således hindras av återfyllningen och inte av sprickan.

- Påverkan av hög matrispermeabilitet (10^{-12} m/s i stället för 10^{-13} m/s) är inte särskilt stor för 30/70-blandning och Friedlandlera (en faktor 1–2 gånger snabbare), eftersom den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten (inklusive sprickorna) inte påverkas särskilt mycket och den hydrauliska konduktiviteten i återfyllningen är fortfarande mycket högre än i bergmatrisen.
- Om inga utloppsvägar finns för luften i den ursprungliga omättade återfyllningen, annat än genom det omgivande berget, kommer den instängda luften att påverka mättnadsprocessen. Den instängda luften bildar då en ”bubbla”, som hindrar inflödande vatten och försenar vattenmättnaden. Denna effekt blir viktigare ju högre permeabilitet berget har. När vattentillflödet från berget är stort kommer gasdiffusionshastigheten att styra vattenmättnadsprocessen.

In situ-packad Friedlandlera med låg densitet har antagits. Om förkompakterade block används i stället kommer densiteten att vara högre, den hydrauliska konduktiviteten lägre och tiden till full mättnad avsevärt längre. Förnyade beräkningar behövs för att studera detta.

Mätningarna av vattenmättnadsförloppet i Prototypförvaret antyder att bevätningen av 30/70-blandningen gått fortare än förväntat, vilket kan tyda på att det förekommer kanalbildning i återfyllningen.

Program

Mätningarna i Prototypförvaret fortsätter. Vid brytningen kommer provtagning och vattenkvotsbestämning att visa om vattenmättnadsförloppet för hela återfyllningen gått så fort som mätningarna antyder.

Kunskapen om bevättningsprocesserna i block av till exempel Friedlandlera och i pelletfyllning är i dag otillräcklig för att en bra prediktering av bevättningshastigheten ska kunna göras. Laboratorieförsök med dessa material bör därför genomföras. Problematiken påminner om den för bufferten, med liknande svällning av block och kompression av pelletfyllning. De kvalificerade kopplade hydromekaniska modeller, som utvecklas för bufferten, bör därför också appliceras på återfyllningen.

Bevättningsförloppet i en återfyllning med block av Friedlandlera och med bentonitpelletar i spalten mellan berg och block kommer att studeras, dels i liten skala i laboratorium för de separata faserna och dels i försök i Äspölaboratoriet med det sammansatta konceptet. Därvid kommer både höga och låga inflöden från berget att studeras.

Delar av modellberäkningarna refererade ovan kommer att göras om med återfyllning av block och pelletar av Friedlandlera.

25.2.7 Vattentransport vid mättade förhållanden

Processen är identisk med motsvarande process för bufferten, så när som på några viktiga skillnader i egenskaperna, speciellt för konceptet med 30/70-blandning. Vattengenomsläppligheten efter vattenmättnad bestäms av innehållet av montmorillonit och andra lermineral, porvattensammansättningen och densiteten, men också av homogeniteten. Till skillnad från bufferten kan återfyllning av bergkross blandat med bentonit inte bli höggradigt homogen. Detta beror dels på att blandningsförfarandet inte ger någon jämn fördelning av komponenterna bentonit och bergkross, dels på att utläggningen och packningen inte kan göras lika effektiv över återfyllningens hela tvärsnitt och längd.

Problemen med att erhålla tillräcklig hög densitet och homogenitet för 30/70-blandning som packas in situ, i kombination med den stora inverkan av salt grundvatten och därmed problem att erhålla tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet, har gjort att det alternativa konceptet med block av till exempel Friedlandlera (alternativt 30/70-blandning) och bentonitpelletar förts fram som huvudkoncept.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Slutsatsen var att undersökning av hydraulisk konduktivitet hos blandningar skulle fortsätta främst inom projektet Backfill and Plug Test medan undersökningar av övriga koncept skulle göras i ett eget projekt (Baclo).

Vid granskningen kommenterade SKI i mer allmänna ordalag att SKB även för återfyllningen systematiskt borde analysera de egenskaper, händelser och processer som på sikt kan leda till en försämrad funktion. Specifikt ansåg man att Milosbentoniten kunde behöva testas ytterligare, eftersom den täthet som uppnåtts i Prototypförvaret inte är tillräcklig. Tolkningen av detta uttalande var att man drog samma slutsats som SKB om svårigheterna att uppnå tillräcklig densitet för blandningar som packas in situ.

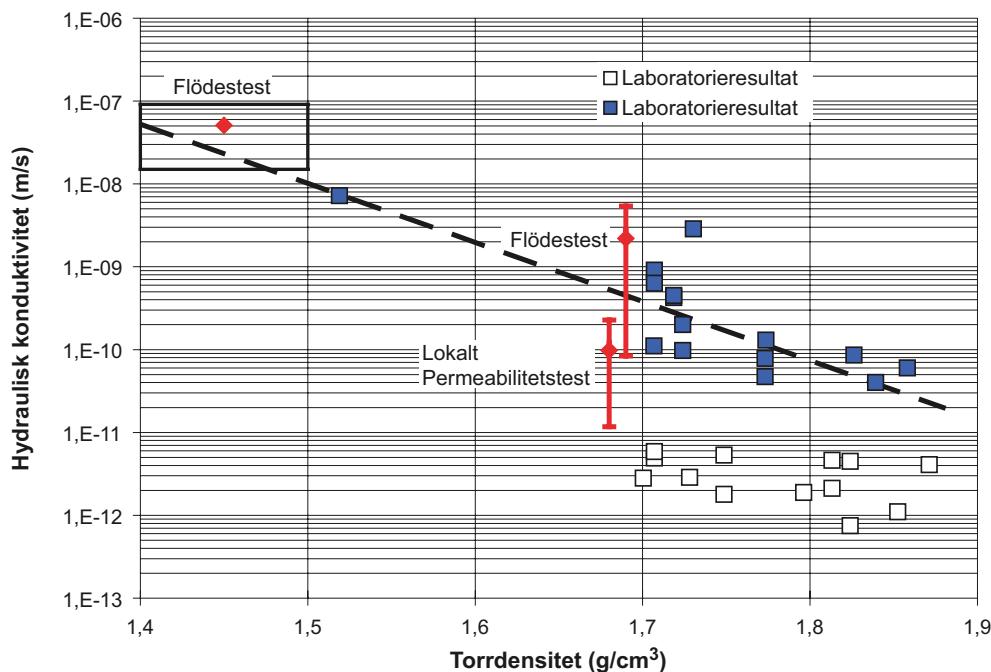
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I SR-Can konstateras att block av antingen Friedlandlera eller 30/70-blandning krävs för att uppnå tillräcklig densitet hos återfyllningen. I sådana fall uppfyller båda materialen ställda krav på hydraulisk konduktivitet. Friedlandleran ger emellertid klart lägre hydraulisk konduktivitet och därmed större marginaler än 30/70-blandningen. Problem med bland annat läkning av erosionskanaler i 30/70-blandningen har gjort att Friedlandleran utsetts till huvudkandidat.

In situ-mätning av hydraulisk konduktivitet hos återfyllningen efter full vattenmättnad i Backfill and Plug Test har utförts efter Fud-program 2004. Mätningarna har gjorts på det inpackade materialet av 30/70-blandning. Två typer av mätningar har genomförts:

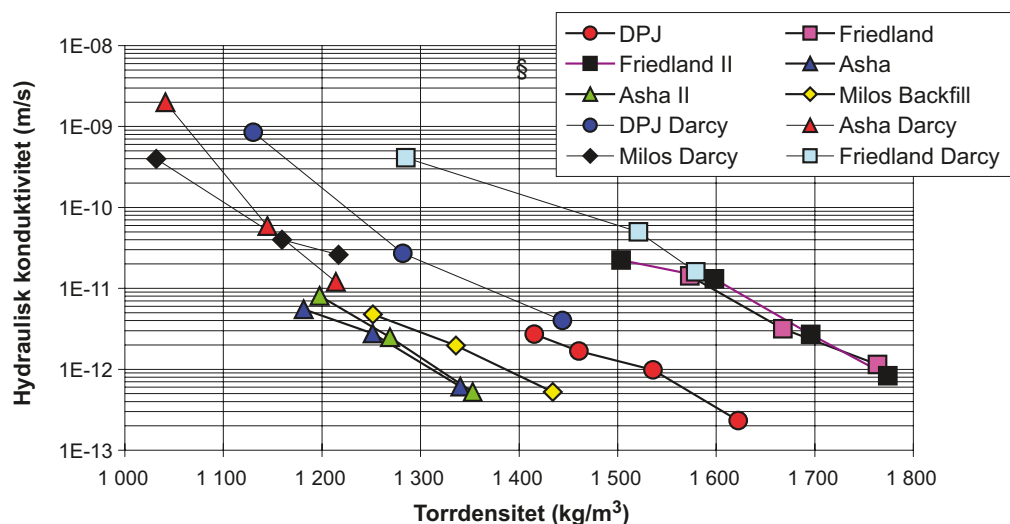
- Medelpermeabiliteten över ett stort tvärsnitt har utvärderats genom att en konstant hydraulisk gradient applicerats mellan filtermattorna och flödet har mätts.
- Lokal permeabilitet har utvärderats runt filterspetsar, som installerats i återfyllningen genom att ett konstant vattentryck applicerats i filtret och flödet mätts.

Resultaten sammanfattas i figur 25-1 tillsammans med resultat från laboriemätningar. Resultaten visar klart att torrdensiteten 1 700 kg/m³, som uppnåddes i centrala delar av återfyllningen i fältförsöken, ger en hydraulisk konduktivitet som för vatten med salthalten 1,2 procent är större än 10⁻¹⁰ meter per sekund.

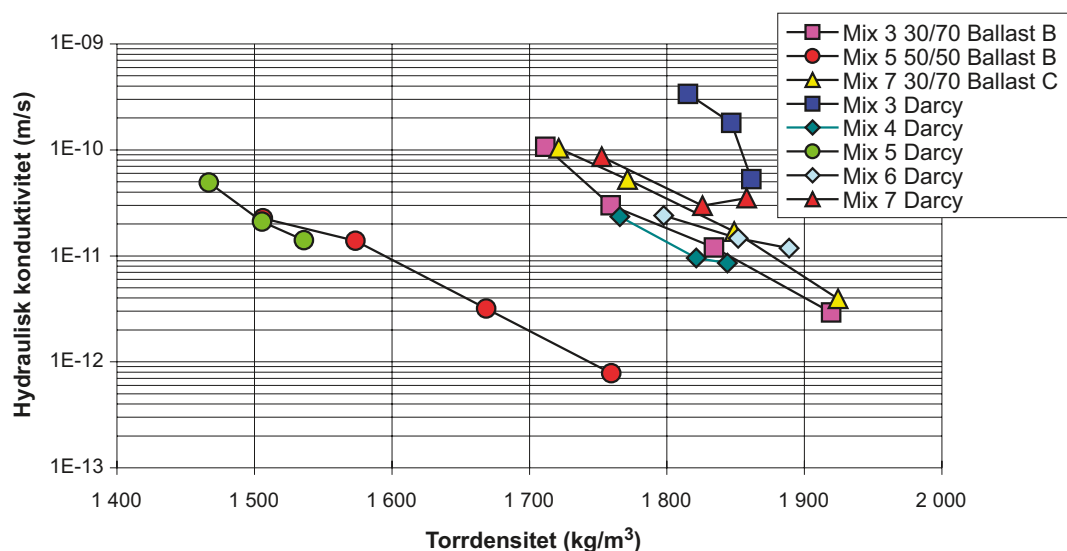


Figur 25-1. Sammanställning av resultat från mätning av hydraulisk konduktivitet hos återfyllning bestående av en blandning av 30 procent bentonit och 70 procent krossat berg. De fyrkantiga blåa markeringarna är resultat från laborietester med samma vatten som i fältförsöket (1,2 procent salt), medan de röda markeringarna är resultaten från testerna i fält.

Laboratoriemätningar av hydraulisk konduktivitet hos olika leror och lerblandningar som är kandidatmaterial för återfyllning har genomförts i projektet Baclö /25-3/. En sammanfattning av dessa resultat för vatten innehållande 3,5 procent salt visas i figurerna 25-2 och 25-3. Resultaten visar bland annat att kraven på torrdensitet för att uppnå en hydraulisk konduktivitet mindre än 10^{-10} meter per sekund är mycket olika. För de naturliga lerorna behöver torrdensiteten ligga mellan 1 100 kg/m^3 och 1 500 kg/m^3 , beroende på kvalitet. I allmänhet är detta betydligt lägre än vad som uppnås vid blocktryckning och vad som krävs från kompressibilitetssynpunkt. För alla blandningar utom 50/50 krävs en torrdensitet större än 1 700 kg/m^3 .



Figur 25-2. Hydraulisk konduktivitet hos naturliga leror utvärderade från ödometerförsök och flödestester (Darcy) med 3,5 procent salt i tillsatt vatten.



Figur 25-3. Hydraulisk konduktivitet hos blandningar av Deponit-Ca-bentonit och olika ballastmaterial utvärderade från ödometerförsök och flödestester (Darcy) med 3,5 procent salt i tillsatt vatten. Mix 4 och Mix 5 innehåller 40 respektive 50 procent bentonit, medan övriga blandningar innehåller 30 procent bentonit.

Program

Inga fler fältmätningar av hydraulisk konduktivitet är planerade i projektet Backfill and Plug Test. Däremot kommer densiteterna att verifieras vid utgrävningen och eventuellt kompletterande tester att göras på det utgrävda materialet.

Projektet Baclö fortsätter och kompletterande mätningar av hydraulisk konduktivitet kommer att göras på kandidatmaterialen vid de densiteter som förväntas uppkomma i fält.

Behovet av ett nytt fältförsök med återfyllning av block och pelletar och motsvarande mätningar som i projekten Backfill and Plug Test kommer att övervägas.

25.2.8 Gastransport/gaslösning

Gastransport i återfyllningen bedöms inte vara en viktig process. Om gas kan ta sig igenom bufferten, finns det tillräcklig transportkapacitet i berget för att vägen genom återfyllningen ska bli ointressant.

25.2.9 Piping/erosion

Processen är densamma som för bufferten, men effekten kan vara allvarigare eftersom läkningsförmågan är sämre för de flesta kandidatmaterialen. Däremot mildras konsekvenserna för säkerheten på grund av avståndet till kapseln.

Processen hanterades inte i Fud-program 2004, men SKI menade att SKB även för återfyllningen bör utreda de effekter av kanalbildning och erosion som kan leda till förlust av material efter förslutning av en deponeringstunnel. I SR-Can konstateras att processen kan leda till förlust eller omfördelning av den svällande lerkomponenten, vilket medför ökad hydraulisk konduktivitet och minskat svälltryck. Osäkerheterna om konsekvenserna är i dag stora och försök behövs för att utreda dessa. En tät ändplugg i deponeringstunneln kommer förmodligen att behövas för att förhindra att stora mängder försvinner.

I projektet Baclö har ett flertal testserier utförts /25-4/ och ytterligare serier pågår för att undersöka erosions- och tätningsegenskaperna hos några återfyllningskandidater:

- Erosionen hos block av Friedlandlera då vatten får flöda i en ränna av block undersöks genom att mängden eroderad lera i vattnet mäts. Densiteten hos blocken, flödehastigheten, salthalten hos vattnet och flödestiden varierar.
- Erosion hos pelletfyllning undersöks på motsvarande sätt. Olika pelletstorlek, bentonitsort, flödehastighet och salthalt hos vattnet varierar.
- Förmåga hos bentonitpelletar att täta sprickor där eroderande material rinner.

Preliminära resultat visar att salthalten i vattnet och hur mycket vatten som runnit genom kanalen spelar stor roll för erosionen, uttryckt som massa eroderat material dividerat med massa vatten. Erosionen ligger i allmänhet mellan 1 och 10 gram per liter vatten. Ju lägre salthalt och ju mer vatten (längre tid) desto mindre erosion. Bentonitpelletar tycks också kunna täta sprickor mindre än 0,15 millimeter.

Försöken kommer att fortsätta och kompletteras med motsvarande försök med andra material. Målet är att gränssätta den mängd återfyllning som kan erodera bort dels innan fullständig tätning med ändpluggen uppnåtts och dels genom intern omfördelning av eroderat material.

25.2.10 Svällning

Återfyllningens svällnings- och kompressionsegenskaper är viktiga för slutförvarets funktion, se inledningen av detta kapitel.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att återfyllningens kompressions- och svällningsegenskaper är viktiga och ska undersökas. Återfyllningens påverkan på tunnelkonvergens studerades.

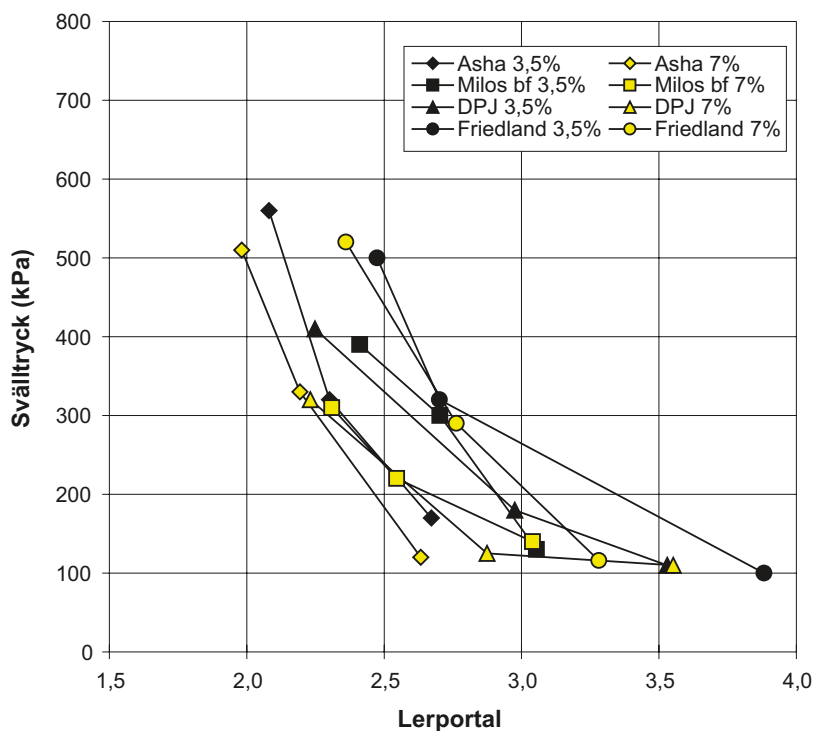
Nyvetenskap sedan Fud 2004

SR-Can konstaterar att kompressions- och svällningsegenskaperna hos block av både Friedlandlera och 30/70-blandningar är tillräckliga för att erhålla tillräckligt svälltryck mot berget och för att hindra för stor uppsvällning av bufferten i deponeringshålet. Däremot är läkningsförmågan vid kanalbildning och erosion mer tveksam för blandningar, varför Friedlandlera förordas.

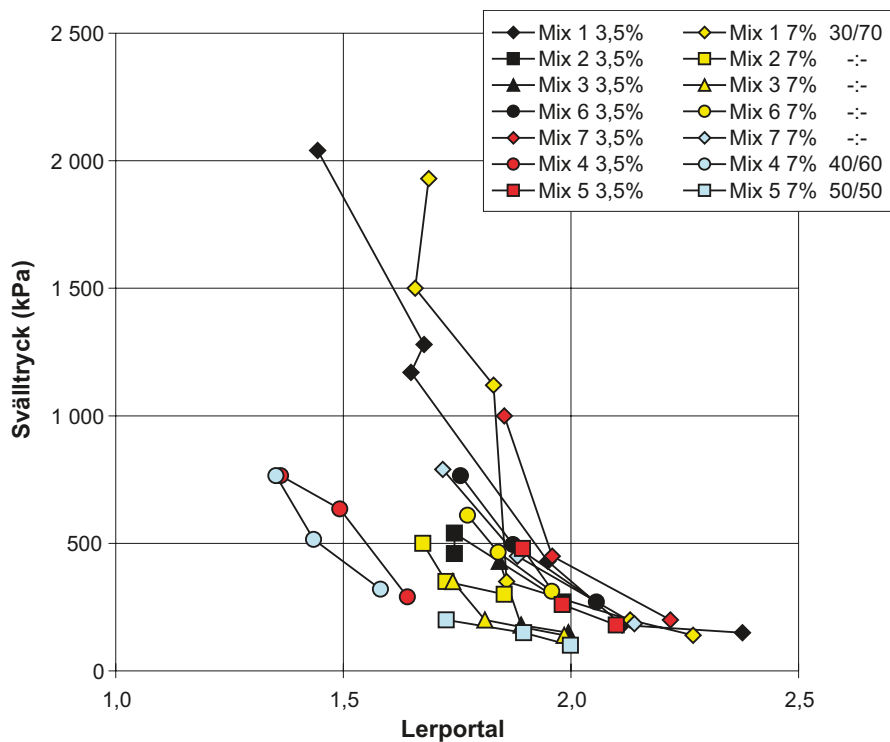
I projektet Baclo har svälltryck, svällnings- och kompressionsegenskaperna undersökts för ett flertal återfyllningskandidater. Följande undersökningar har gjorts eller pågår:

Mätning av svälltryck har genomförts med fyra olika naturliga leror och ett flertal blandningar av 30–50 procent bentonit med 50–70 procent ballastmaterial, vilka mättats med vatten innehållande 3,5 procent respektive 7 procent salt. Exempel på resultat sammanfattas i figurerna 25-4 och 25-5 där svälltrycket plottas som funktion av lerportalet. Försöken har gjorts för att undersöka gränsen för när 100 kPa svälltryck uppkommer, varför portalen är relativt höga. Denna gräns ligger vid lerportalet 2,0 eller högre för alla materialen, vilket motsvarar en torrdensitet (hos lerfasen) av cirka 0,9. Resultaten visar att stora marginaler till minimisvälltrycket kommer att finnas för de naturliga lerorna, eftersom den slutliga densiteten hos de utsvällda blocken ger betydligt lägre lerportal. Marginalerna är inte lika stora för blandningarna.

Mätning av kompressibiliteten hos motsvarande återfyllningskandidater har också gjorts med ödometerförsök. Materialen har pålastats stegvis och deformationerna mätts. Sambanden mellan densitet och pålagd last har sedan använts för att beräkna hur olika kombinationer av buffertdensiteter, återfyllningsmaterial och återfyllningsdensiteter påverkar uppsvällningen av bufferten i deponeringshålen.



Figur 25-4. Uppmätta svälltryck som funktion av lerportalet hos fyra olika naturliga leror. Teckenförklaringen beskriver lerans namn och salthalten i det tillsatta vattnet.



Figur 25-5. Uppmätta svälltryck hos blandningar bentonit och ballast som funktion av lerportalet. Teckenförklaringen beskriver blandningens nummer, salthalten i det tillsatta vattnet och blandningsförhållandet bentonit/ballast.

Tabell 25-1 visar vilka torrdensiteter de olika återfyllningsmaterialen behöver ha för att klara följande tre krav:

1. Svälltryck större än 200 kPa (större marginal än funktionsindikatorn).
2. Hydraulisk konduktivitet mindre än 10^{-10} m/s.
3. Kompressibiliteten ska inte vara större än att buffertens uppsvällning ger en mättnadensitet vid kapsellocket högre än $1\,950\text{ kg/m}^3$.

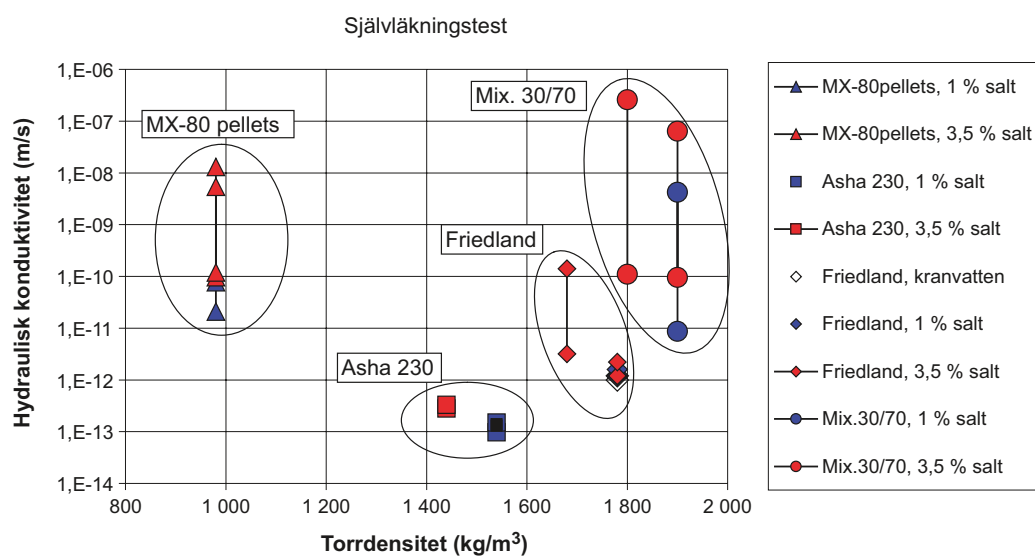
Tabell 25-1. Erforderlig torrdensitet hos de olika buffertkandidaterna för att uppfylla de tre kraven på svälltryck, hydraulisk konduktivitet och kompressibilitet.

Materialtyper	Erforderlig torrdensitet (kg/m^3) baserat på:		Deformationsegenskaper
	Hydraulisk konduktivitet	Svälltryck	
Asha 230	1 120	1 050	1 160
Milos bf	1 090	1 060	1 240
DJP	1 220	1 240	1 400
Friedland	1 400	1 350	1 510
30/70-blandning	1 700–1 890	1 730–1 800	1 690
50/50-blandning	1 280	1 450	1 560

Tester av återfyllningsmaterialens självläkningsförmåga pågår. Försöken utförs på följande sätt: Prover med dimensionerna 50 millimeters diameter och 50 millimeters höjd vattenmätas i ödometrar, varefter den hydrauliska konduktiviteten bestäms på det orörda provet. Därefter borrar ett hål med diametern 5 eller 10 millimeter i provet och provet som sedan får självläka med fri tillgång till vatten under cirka tre veckor. Därefter mäts den hydrauliska konduktiviteten återigen. Salthalterna 1 eller 3,5 procent används i det tillsatta vattnet. Figur 25-6 visar resultaten av de hittills utförda försöken. Asha- och Friedlandlera med hög densitet får inga kvarstående skador. Friedlandlera med lägre densitet får förhöjd hydraulisk konduktivitet. I blandningarna var självläkningen dålig och ett kvarstående hål kunde observeras. Pelletarna uppvisade motsvarande dåliga läkning vid den höga salthalten beroende på den låga densiteten. I en återfyllning av block med pelletar i spalten kommer densiteten och läkningsförmågan hos pelletfyllningen att öka markant på grund av utsvällningen av blocken.

Program

Studierna av svällnings- och kompressionsegenskaperna hos olika återfyllningskandidater fortsätter inom Baclo-projektet. Detsamma gäller undersökningarna av materialens mekaniska samverkan med buffert och berg. Samverkan mellan de inplacerade återfyllningsblocken och den pelletfyllda spalten ska också studeras, så att initialtillståndet efter full homogenisering blir känt. Kompressions- och hållfasthetsegenskaperna hos det sammansatta systemet av block, spalter och pelletar före bevättning ska undersökas i laboratorium för att konsekvenserna av specialfallet med en torr tunnel och ett vått deponeringshål ska kunna beräknas, eftersom uppsvällningen av bufferten innan återfyllningen bevåtts inte får bli för stor.



Figur 25-6. Jämförelse av hydraulisk konduktivitet hos olika återfyllningsmaterial mätt dels i orört tillstånd och dels efter att ett fem millimeter stort hål borrats genom provet och tillåtits läka under tre veckor. Det lägre värdet motsvarar orört tillstånd.

25.2.11 Termisk expansion

Processen kan försummas i återfyllningen.

25.2.12 Advektion

Studier av transport av kollider i glacialvatten har påbörjats (egentligen i berget). Även erosion av material under installationsfasen har studerats i främst Baclo-projektet. För övriga studier, se avsnitt 25.2.6 och 25.2.7.

25.2.13 Diffusion

Om återfyllningsmaterialet har låg hydraulisk konduktivitet kommer diffusion att vara den dominerande transportmekanismen för lösta specier.

25.2.14 Osmos

Se avsnitt 24.2.14.

25.2.15 Jonbyte/sorption

Se avsnitt 24.2.15.

25.2.16 Montmorillonitombildning

Se avsnitt 24.2.16.

25.2.17 Lösning/fällning föroreningar

Se avsnitt 24.2.17.

25.2.18 Kolloidfrigörelse/erosion

Se avsnitt 24.2.18.

25.2.19 Strålinducerad montmorillonitombildning

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och därför även försumbar i återfyllningen.

25.2.20 Radiolys av porvatten

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och därför även försumbar i återfyllningen.

25.2.21 Mikrobiella processer

I återfyllningsmaterialet ökar möjligheterna till bakteriell aktivitet med minskande densitet och ökande vattentillgång. Många bakterier konsumerar syre vid sin förbränning av organiskt material, metan, tvåvärt järn och svavel, se avsnitt 24.2.21.

25.2.22 Radionuklidtransport – advektion

Radionuklider antas kunna transporteras både advektivt och diffusivt genom deponeringstunnlarna. I normalfallet antas den diffusiva transporten vara dominerande och den advektiva transporten försumbar /25-5/. Men om återfyllningens konduktivitet av någon anledning skulle vara högre kan den advektiva materialtransporten få betydelse för säkerhetsanalysen av ett KBS-3-förvar. Som del

i arbetet med SR-Can undersöktes betydelsen av detta genom att ansätta 100 gånger högre konduktivitet i deponeringstunnlarna jämfört med det basfall som valts. För de olika simuleringsfallen jämfördes sedan den tid och sträcka en partikel måste vandra i deponeringstunneln innan den går in i en sprickzon i berget och lämnar närområdesmodellen.

Utifrån detta beräknas sedan en advektiv transporthastighet som sedan används som indata för de transportmodelleringar som utfördes med simuleringsprogrammet Compulink /25-6/. Simuleringarna i SR-Can visade att effekten av denna ökade advektiva transport i deponeringstunnlarna var av begränsad betydelse för de KBS-3-förvar som studerades i SR-Can /25-7/.

25.2.23 Radionuklidtransport – diffusion

Diffusion av radionuklider i återfyllningen är av underordnad betydelse för förvarets säkerhet. Andra transportvägar dominerar spridningen av radionuklider från en skadad kapsel.

25.2.24 Radionuklidtransport – sorption

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Slutsatser baserade på bland annat erfarenheterna från SR 97 var att sorption av radionuklider i återfyllningen har mycket begränsad betydelse för förvarets funktion.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Radionuklidtransportparametrar för en återfyllning som består av block av högkompakterad Friedlandlera diskuteras i /25-8 och 25-9/. Rekommenderade värden för följande parametrar tillsammans med tillhörande osäkerheter har tagits fram och dokumenterats för alla relevanta element och oxidationsförhållanden:

- Porositet tillgänglig för diffusion (ϵ).
- Effektiv diffusivitet (D_e).
- Fördelningskoefficient (K_d).

I princip har data och osäkerheter tagits fram baserade på ett liknande projekt som genomfördes nyligen för sorption i MX-80 /25-8/. Eftersom K_d är beroende av rådande förhållanden, har värden tagits fram för de förutsättningar som är relevanta för analysen. Om möjligt, har K_d -värden utvärderats för specifika porvattenkemier och fastfas/vätskeförhållanden som är representativa för Friedlandlera kompakterad till en torrdensitet av 1 780 kg/m³. I de fall där experimentella data eller sorptionsmodeller med tillräcklig kvalitet saknas har de referensvärden som valts i /25-9/ skalats om till sorptionskapaciteten för Friedlandlera. De förslagna värdena för diffusivitet D_e och porositet ϵ är baserade på de relationer som finns angivna i /25-9/, vilka gör det möjligt att beräkna dessa parametrar som en funktion av densiteten. De tillhörande osäkerheterna har kvalificerats för en given uppsättning förhållanden och har ytterligare uppskattats för variabiliteten under dessa förhållanden.

Program

SKB anser inte att sorption i återfyllningen är ett prioriterat forskningsområde. Underlaget i /25-8/ bör vara tillräckligt bra för att användas i SR-Site.

25.2.25 Radionuklidtransport – speciering av radionuklider

Specieringen av radionukliderna har betydelse för sorptionen och diffusionen i återfyllningen. Den påverkas av vilken speciering nukliden hade vid randen till återfyllningen, det vill säga inuti bufferten, men också av de kemiska förhållandena i återfyllningen.

Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 22.2.14.

25.3 Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

De direkta slutsatserna som rapporterades i samband med granskningen av Fud-program 2004 var relaterade till modellbeskrivningen. Denna har nu förbättrats.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Erfarenheter från säkerhetsanalysen SR-Can – och främst de positiva resultat som rapporterats från försöken att sammanfoga kapsel och lock – gör att kraven som ställs på en programkod för radionuklidtransport i närområdet delvis formulerats om. De scenarier för radionuklidtransport i närområdet som analyserades var i huvudsak ett fall med delvis eroderad buffert runt deponeringshållet (benämns advection case i SR-Cans huvudrapport) samt ett fall där kapseln skjuvats på grund av jordskalv (benämns shear case). Det fall med en kapseldefekt som gradvis expanderar (benämns pinhole case), vilket traditionellt använts i radionuklidtransportberäkningar, har reducerats till ett illustrativt fall.

Program

De delvis förändrade kraven gör att utvecklingsarbetet av programkoder för närområdet måste bedrivas i ett än närmare samarbete med det metodik- och forskningsarbete som utförs som en del i SR-Site. De förändringar i kodkonceptet som gjordes inför Fud-program 2004 då ett byte i programmeringsmiljö från den tidigare Fortranbaserade Comp23 till Compulink, som bygger på Matlab och Simulink, anses förenkla detta arbete.

26 Geosfär

26.1 Initialtillstånd för geosfären

Slutförvaret ska förläggas i vanligt förekommande kristallint berg med granitisk sammansättning. Analysen av långsiktig säkerhet utgår från det tillstånd som råder då förvaret just förslutits. Detta kräver i sin tur kännedom om tillståndet som rådde innan förvaret byggdes och hur det sedan påverkades. Resultatet av platsundersökningarna är det primära underlaget för att kunna bestämma geosfärens tillstånd efter förslutning. Platsundersökningarna behandlas i del II.

Framför allt påverkas grundvattenflödet och grundvattentrycket av dräneringen av anläggningen under förvarets byggnation och vid deponeringen av kapslarna under driftskedet. Om vatten med avvikande sammansättning strömmar mot förvaret kan även grundvattenkemin påverkas av grundvattenflödet. De kemiska förhållandena påverkas också av att förvaret står öppet och olika material tillförs. Förvarets initialtillstånd berörs bland annat av spänningsomlagringar, som kan ske i samband med förvarskonstruktionen. Hur stor påverkan blir beror av flera faktorer, bland annat av hur förvaret byggs och hur lång tid det dräneras.

Förvaret utformas främst för att få en så god funktion och säkerhet som möjligt. Kapsel- och tunnelavstånd bestäms av krav på temperaturen i och kring förvaret och större sprickzoner undviks. Generellt gäller att de förhållanden i berget, som är fördelaktiga för den långsiktiga säkerheten, också innebär god byggbarhet och säker arbetsmiljö. En god byggbarhet och en stabil berganläggning är dessutom fördelaktigt för säkerheten under anläggningens drift.

26.2 Processer i geosfären

26.2.1 Översikt av processer

Värme som alstras i bränslat leds ut via kapseln och bufferten och värmer upp det omgivande berget. Grundvattnet omfördelas i geosfärens spricksystem genom grundvattenströmning. Även gasströmning kan förekomma. I geosfären råder initialt ett mekaniskt tillstånd, som bestäms av de naturliga bergspänningarna och spricksystemen på förvarsplatsen samt av de förändringar som konstruktionen av förvaret givit upphov till.

Den mekaniska utvecklingen bestäms av hur geosfären svarar på de olika mekaniska laster den utsätts för. Lasterna kan utgöras av den termiska expansion som uppvärmningen av förvaret leder till, trycket från svällande buffert och återfyllning, effekter av jordskalv och den storskaliga tektoniska utvecklingen. Förändringarna i geosfären kan förekomma i form av sprickbildning, reaktivering (plötsliga rörelser i befintliga sprickor), eller bergkryp (långsamma omlagringar i berget). Dessutom förekommer rörelser i intakt berg, det vill säga kompression eller expansion av i övrigt intakta bergblock, samt erosion, det vill säga vittring av ytberget i samband med framför allt istider.

Den kemiska utvecklingen efter förslutning bestäms av en rad transportprocesser och reaktioner. Den dominerande transportprocessen över långa sträckor är advektion, medan diffusion spelar stor roll över korta sträckor och i partier där vattnet är stillastående.

Vid advektion följer vattenlösta ämnen med det strömmande vattnet. Processen leder bland annat till att olika vattentyper från olika partier av geosfären blandas. Reaktioner sker mellan grundvattnet och sprickytor och dessa ger upphov till lösning och fällning av sprickmineral. Dessutom sker mycket långsamma reaktioner mellan grundvatten och mineral i bergmatrisen. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från förvarskonstruktionen, kolloidbildning och gasbildning. Vid en glaciation kan också metanisbildning och saltutfrysning förekomma.

Diffusion kan vara betydelsefull om vattnet är stillastående eller rör sig mycket långsamt. En viktig aspekt av detta är matrisdiffusion, det vill säga att radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och på så sätt undandras och transporteras långsammare än det flödande vattnet. Avgörande för radionuklidtransporten är även sorption, det vill säga det faktum

att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa.

Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsfenomenen. Vissa nuklider kan transporteras i gasfas. Det radioaktiva sönderfallet påverkar innehållet av radionuklider i grundvattnet och måste därför inkluderas i beskrivningen av transportfenomenen.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet om olika processer i geosfären som kan inverka på den långsiktiga säkerheten.

26.2.2 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisades studier om hur man kan beräkna kapselns maxtemperatur och sambanden med bergets värmetransportegenskaper, kapseffekten vid deponering, deponeringsgeometrin och förhållandena i bufferten. I beräkningarna, som kan utföras med olika kombinationer av analytiska och numeriska metoder, beaktades värmespridningsproblemet i olika skalor /26-1/. Olika laboratoriebaserade metoder för att prediktera värmekonduktiviteten hos berget närmast ett borrhål jämfördes med en storskalig metod för att mäta direkt i borrhålen, det vill säga termisk responstest /26-2/. Vid dessa fälttester överskattades värmekonduktiviteten med cirka 25 procent jämfört med effektiv värmekonduktivitet baserad på laboratoriemätningar. Det konstaterades att fullskalemetoden behöver utvecklas, så att man kan kompensera för effekter av vattenrörelser i borrhålen under mätning.

Vidare redovisades i Fud-program 2004 en systematisk utvärdering av några metoder för att bestämma värmekonduktivitet och värmekapacitet i laboratorium /26-3/. En preliminär strategi hade utarbetats för en beskrivande termisk modell under platsundersökningsskedet /26-4/. Skalberoendet hos effekter av bergartsfördelning hade analyserats /26-5/. För övrigt hade värmekonduktiviteter, uppmätta eller beräknade från mineralogisk sammansättning, analyserats statistiskt. Därutöver presenterades preliminära samband mellan bergarternas densitet och värmekonduktivitet.

Myndigheterna konstaterade att SKB modifierat sina forskningsinsatser i förhållande till tidigare Fud-program och ansåg att SKB med de nu delvis genomförda och ökade insatserna har en bättre ambitionsnivå i sitt program för att lösa viktiga kvarstående frågor inom värmetransportområdet. Man påpekade vikten av att SKB studerar inverkan av anisotropin och att SKB aktivt fortsätter med att ta fram ett fältinstrument som kan bestämma bergmassans termiska egenskaper i borrhål. Vidare ansågs det väsentligt att fortsätta med de pågående temperaturmätningarna i Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet för att ge möjlighet till kalibrering av de nu använda termiska modellberäkningarna samt att kunna utnyttja de termiska parametervärdena från laboratorietesterna vid Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP).

Myndigheterna ger en generell kommentar att det är viktigt att uppmärksamma de störningar som sker genom utsprängningen av förvaret. Undermarksarbetet kan påverka såväl de termiska som de bergmekaniska initialtillstånden.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

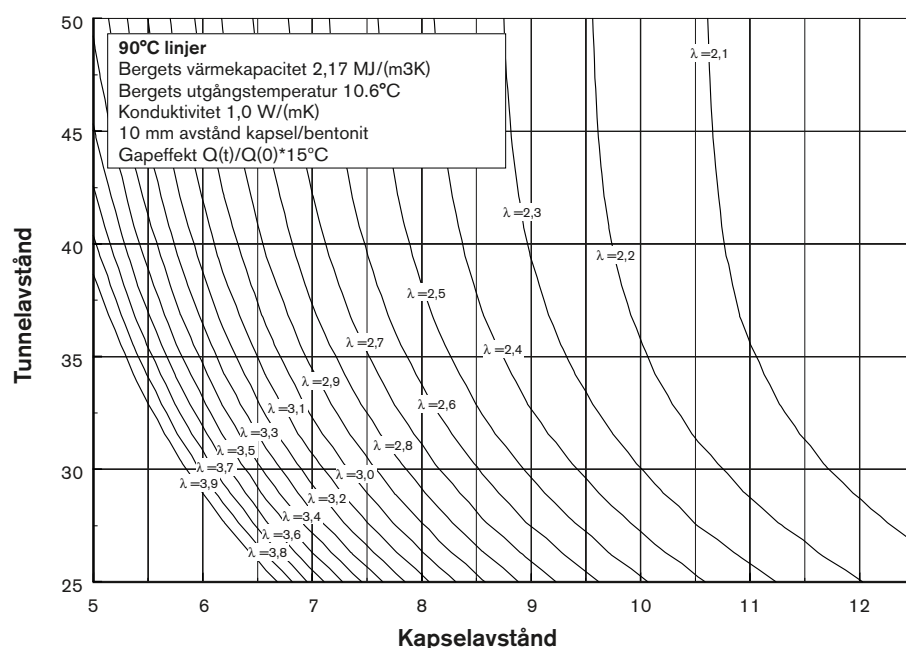
Det temperaturkriterium som nu gäller avser den maximala bentonittemperaturen, medan det kriterium som gällde tidigare avsåg kapselytans temperatur. I torra deponeringshåll, där den vertikala spalten mellan kapsel och bentonit finns kvar under tiotals år efter deponeringen, kommer den maximala bentonittemperaturen att finnas vid kapselns basytor där buffert och kapsel är i direkt termisk kontakt. En termisk analys av systemet kapsel-buffert har genomförts där detta har beaktats /26-6/. Data för de termiska egenskaperna hos de olika komponenterna (spalt, bentonitblock, pellettfyllning) har tagits fram med hjälp av mätresultat från det torra och väl instrumenterade håll nummer 6 i Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet /26-7/. Figur 24-3 i avsnitt 24.2.3 visar temperatur i buffert och berg runt en KBS-3-kapsel, med en 10 millimeters spalt mellan den vertikala kapselytan och omgivande bentonitblock, för två olika antaganden om bergets värmeledningstal. Efter 20 år är

den beräknade skillnaden i bentonittemperatur cirka 13 grader, vilket är ett mått på den totala inverkan av den luftfyllda inre spalten ifall spalten är likformig längs kapselns hela höjd och runt hela kapselperiferin. Spalteffekten är direkt proportionell mot kapselns värmeeffekt och minskar med tiden. Resultaten av analysen /26-6/ kan användas direkt för att beräkna den maximala bentonittemperaturen för godtyckliga deponeringsgeometrier med en analytisk metod liknande den som använts tidigare /26-1/. Spalteffekten ingår som ett tidsberoende temperaturtillskott. Figur 26-1 visar som exempel 90 °C isolinjer i ett kapsel-tunnelavståndsnomogram, det vill säga de kapsel- och tunnelavstånd som skulle behövas om man utgår från att den totala modell- och dataosäkerheten är 10 °C.

Med den ovan nämnda analytiska lösningen kan man lätt undersöka effekter av olika störningar i layouten, till exempel temperaturökningen som skulle följa av att en enskilda kapselposition behöver förskjutas en liten sträcka (till exempel för att undvika en spricka som kan misstänkas ha stor utsträckning). Analysen visar att bentonittemperaturen hos en kapsel kan öka med omkring en grad om avståndet till en grannkapsel reduceras med en meter och deponeringsgeometrin i övrigt är oförändrad /26-8/.

En principiell metod har utvecklats för att skala upp laboratoriebestämningar av värmeledningstalet hos olika bergarter till skalor som är relevanta för att beräkna temperaturutvecklingen hos enskilda kapslar i typiska deponeringsgeometrier /26-9/. Uppskalningsmetoden beaktar variabilitet inom bergarter och mellan bergarter.

Karakterisering av berggrundens värmeledningsförmåga och dess spatiala variabilitet är kostnads- och tidskrävande om den ska genomföras med hjälp av laboratoriebestämningar. Det finns ett behov av att utveckla rationellare och billigare fältmetoder. Inom ramen för platsundersökningarna har ett utvecklingsarbete fokuserat på alternativa bestämningar av bergarters värmeledningsförmåga. Det är logiskt att förutsätta att värmeledningsförmågan hos en kristallin bergart generellt sett beror på mineralsammansättningen, dess densitet och värmeledningsförmågan för de mineral som ingår i bergarten. Utifrån idealiserade mineralsammansättningar för magmatiska bergarter har ett sådant generellt samband mellan densitet och värmeledningsförmåga demonstrerats. Vidare har detta samband kunnat verifieras med hjälp av undersökningar i laboratorium av bergkärnor från platsundersökningarnas områden. Med geofysiska borrhålsloggningar, som mäter densitetsvariationer (gammasonder), har det sedan varit möjligt att bestämma såväl värmeledningsförmåga som spatial variabilitet för framför allt sura och intermediära magmatiska bergarter /26-10, 26-11/.



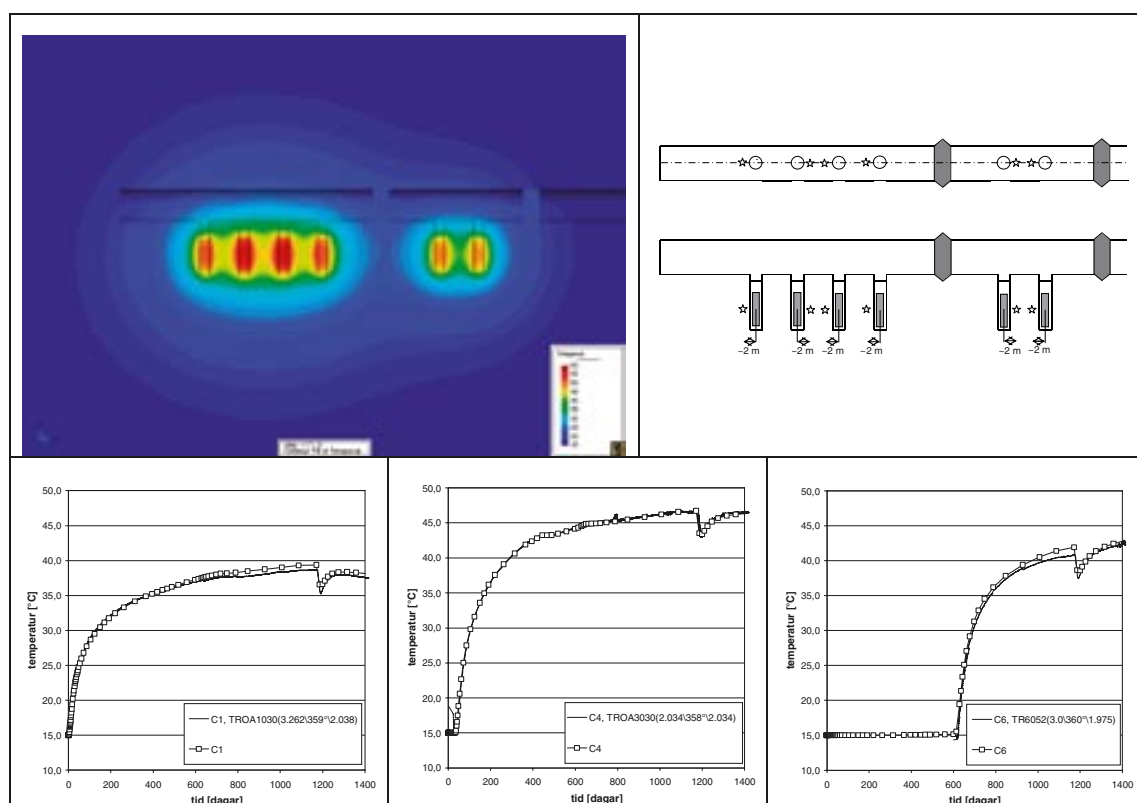
Figur 26-1. Isoliner för 90 °C maximal bentonittemperatur.

Kristensson och Hökmark /26-12/ har analyserat temperaturutvecklingen i Prototypförväret i Äspölaboratoriet. Ett av syftena var att undersöka hur väl den beräknade bergtemperaturen i området närmast de olika kapslarna kan fås att stämma med motsvarande uppmätta temperaturer om man ansätter att värmetransporten kan beskrivas som linjär, isotrop och homogen värmeledning. Detta innebär att man använder sig av ett globalt gällande värmeledningstal – trots att prognoser byggda på laboratoriebestämningar pekar på en standardavvikelse på 0,28 W/(m·K). Figur 26-2 (övre vänstra) visar beräknade bergtemperaturer 1 117 dagar efter att uppvärmningen startade i den inre sektionen, medan övre högra visar positioner för mätpunkter som användes för jämförelse mellan modell och experiment. De tre nedre diagrammen visar jämförelsen för punkterna utanför kapslarna 1, 4 och 6. Motsvarande jämförelser för punkterna utanför kapslarna 2, 3 och 5 gav liknande överensstämmelse, det vill säga med skillnader mindre än 2 °C.

Temperaturutvecklingen i Prototypförvärets bergmassa är viktig inte bara för förståelsen av värmetransporten i berget och kopplingen mellan mätdata i laboratorieskala och utfallet i tunnel-skalan, utan också för att definiera randvillkoren till THM-modeller av buffertens utveckling mot vattenmättnad.

Ett samarbete med Posiva om en borrhålls sond (Tero) för in situ-bestämning av termiska egenskaper har slutförts /26-13/. Vidare har vi gjort en första översiktlig inventering av andra borrhållsmetoder.

Skal- och anisotropieffekter har studerats i fält och utvärderats inför den avslutande platsmodelleringen /26-14, 26-15, 26-16/.



Figur 26-2. Övre vänstra: bergtemperaturer efter 1 117 dagars uppvärmning. Övre högra: instrumentpositioner för jämförelse. Nedre: jämförelse för punkterna utanför kapslarna 1, 4 och 6.

Program

Arbetet med att kvantifiera och begränsa osäkerheterna i temperaturberäkningarna fortsätter. Likaså fortsätter utvecklingen av såväl fält- som laboratoriemetoder för att bestämma termiska egenskaper. Speciellt fokus ägnas metoder för att bestämma avstånden mellan kapslarna i deponeringstunnlarna, vilket bland annat är beroende av de termiska förhållandena.

Arbetet med principerna för den termiska modelleringen av platserna fortsätter. Den rumsliga variationen och uppskalning till relevant skala ska kopplas till de geologiska platsmodellerna och analyseras med geostatistiska metoder.

Temperaturmätningar i borrhål har använts för att bestämma temperaturen på förvarsdjup och för att bekräfta mätningar av vattenströmning med hydrauliska metoder. Fördelningen av temperaturen innehåller emellertid mer information som kan användas för att till exempel:

- Undersöka den rumsliga variationen av värmeledningsförmågan i större skala (är i stora drag proportionell mot temperaturgradienten).
- Bedöma historiska klimatförändringar.
- Bedöma storleken på värmeflödet.

SKB avser att utvärdera om ett program som belyser ovanstående frågeställningar ska genomföras eller inte. Om ett sådant program blir aktuellt, kommer det att samordnas med insatserna inom de klimatintriktade projektområdena, se avsnitt 21.4.

26.2.3 Grundvattenströmning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att de två modellverktygen ConnectFlow och DarcyTools skulle vidareutvecklas och tillämpas i flera projekt. Så har skett och redovisas nedan. Vidare konstaterades att en satsning skulle ske på utveckling och tillämpning av ytnära hydrogeologisk modellering. Även detta redovisas nedan.

SKI konstaterade i sin bedömning att programmet ger en bra sammanfattning och lägesredovisning av de modellverktyg som används för att beskriva grundvattenströmningen. Vidare ansåg SKI att programmet för utveckling av ConnectFlow och DarcyTools var väl genomtänkt och ambitiöst och att det var en fördel att dessa koder används och testas vid platsmodellering och säkerhetsanalys. Samtidigt poängterade man vikten av att koderna utvärderas och dokumenteras inför tillämpningarna i SR-Can och SR-Site.

SKI förde vidare fram att i applikationer var förenklade antaganden om till exempel randvillkor vid ytan och sjöbottnar samt bergets heterogenitetsstrukturer och de kvartära avlagringarna inte motiverade och konfirmerade ännu. Programmet saknade en plan för hur SKB ska ta fram data för att testa och verifiera dessa modeller. SKB för dock här fram att modellerna kan hantera i princip vilka randvillkor och heterogenitetsstrukturer som helst, men att detta är plats-specifika frågor som hanteras vid platsundersökningar och platsmodellering.

SSI konstaterade i sin bedömning att forskning kring övergången mellan geosfär och biosfär är viktig, men att man saknade en tydlig plan för hur SKB tänker bedriva forskningen om övergången.

Vidare påpekade SSI att resultaten från de genomförda modelleringarna av ytvattenhydrologi bör tolkas med försiktighet, eftersom antagandena var alltför förenklade. Dessutom bör SKB försäkra sig om att nödvändiga data samlas in vid platsundersökningarna. SKB vill här förtydliga att datainsamling är en fråga som hanteras inom platsundersökningarna.

Kasam konstaterade i sin granskning att det är mycket angeläget att genomföra programmet för grundvattenströmning. Vidare förde man fram att information om geologiska strukturer och gränser bör tillföras de regionala strömningsberäkningarna, liksom detaljerade uppgifter om lagerföljder och vattennivåer i bedömda utströmningsområden. Dessa frågor diskuteras nedan i samband med den storregionala studien som utförts över östra Småland.

Kasam förde även fram att den naturliga grundvattenbildningen på förvarsdjup bör bestämmas med olika oberoende metoder.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2004

Grundvattenflödesmodellering har utförts inom platsmodellering, vid säkerhetsanalyserna samt i diverse fristående projekt. Nedan behandlas uppnådda resultat under dessa tre kategorier.

En strategi för hydrogeologisk modellering har successivt utvecklats under platsmodellversionerna 1.1 till 2.1. Specifikt tas dels en hydrogeologisk grundvattenmodell i regional skala fram, samt en HydroDFN-modell (Discrete Fracture Network) i en förvarsskala till lokal skala. Syftet med den regionala beskrivningen är att beskriva dagens hydrogeologiska situation, inklusive den historiska utvecklingen. Här är integrationen av geologiska och hydrogeokemiska data samt ytsystemets egenskaper viktiga komponenter. Den explicita beskrivningen av vattenförande sprickor i HydroDFN-modellen är ett viktigt underlag för design och säkerhetsanalys, men integreras även i den regionala hydrogeologiska beskrivningen. Platsmodeller för de två platserna beskrivs i /26-17, 26-18/. Den primära kunskap dessa modeller har genererat är en beskrivning av platsspecifika förhållanden, men även metodiken för hur man tar fram denna typ av modeller och integrerar data av olika typ är ett viktigt framsteg.

Inom platsmodellering har även framsteg gjorts beträffande ytnära hydrogeologisk modellering och kopplingen av geosfär och biosfär. Modelleringsverktyget Mike She /26-19/ har använts för att bygga upp modeller för simulering av vattenflöden och transport av lösta ämnen i både Forsmark och Simpevarp/Laxemar. Mike She kan användas för simulering av hela "landdelen" av den hydrologiska cykeln och dess kopplingar till processerna i atmosfären (nederbörd och avdunstning). Modelleringen omfattar alltså såväl mättad som omättad strömning i jord och berg som ytvattenströmning på markytan och i vattendrag. Transportmodellering kan också göras, varvid både processer såsom renodlad advektiv transport (partikelspårning) och komplex reaktiv transport kan beaktas.

I de första versionerna av de platsbeskrivande modellerna /26-20, 26-21/ redovisades ythydrologisk modellering baserad på väderdata från SMHI-stationer utanför SKB:s undersökningsområden. Dessa modeller har senare vidareutvecklats genom att de i allt större utsträckning har kunnat byggas på platsdata, i form av både väderdata och platsspecifika data på hydrogeologiska och andra egenskaper /26-22, 26-23/. Vattenbalansens huvudkomponenter (nederbörd, avdunstning och avrinning) har härvid ändrats relativt mycket, särskilt i Forsmark. Ytterligare modelleringar, baserade på uppdaterade modeller och de längre tidsserier som kommer att finnas i slutet av platsmodelleringen, behöver utföras innan representativa medelvärden och variationsmått kan etableras.

Inom SR-Can har metodik utvecklats för att analysera både ett öppet förvar och den långsiktiga hydrogeologiska utvecklingen för ett förslutet och återmättat förvar. Specifikt har metodik utvecklats för att direkt använda de framtagna platsmodellerna i kombination med platsanpassade utformningar av det tänkta förvaret. För de öppna förvarssimuleringarna är frågeställningar såsom påverkansområde med sänkt grundvattenyta, storlek och rumslig fördelning av inflöden i förvaret, samt upptransport av salint grundvatten till förvarsnivå av intresse. Koden DarcyTools har vidare utvecklats för att kunna hantera dessa frågeställningar. En så kallad ostrukturerad grid används, vilken möjliggör hög upplösning vid tunnlar och deponeringshål. En grövre upplösning används i regional skala. Metodiken har använts både för Forsmark och Laxemar /26-24, 26-25, 26-26/. I dessa arbeten har även en första ansats gjorts för att modellera återmättnadsfasen för hela förvarsvolymen.

Koden Mike She har även använts för att simulera öppna förvar /26-23, 26-27/. Generellt ger denna modellering liknande svar som simuleringarna med DarcyTools ovan, men fokus ligger på det ytnära systemet. Specifikt kan årtidsvariationer i den hydrologiska cykeln analyseras, liksom effekten av det öppna förvaret på ytnära hydrologiska processer, såsom omättad strömning och avrinning i vattendrag.

För den långsiktiga säkerheten under återmättade förhållanden är frågor av intresse för grundvattenflödet i närområdet kring deponeringshålen samt transportvägarna för radionukliderna från förvaret till biosfären. Koden ConnectFlow har utvecklats för att explicit inkorporera tunnlar och deponeringshål, så att en kvantifiering av grundvattenflöde för närområdesmodellering kan göras. Vidare beräknas transportvägar och egenskaper längs med dessa flödesvägar (F-faktor, gångtid etc) för olika utsläppsvägar från kapseln (till exempel en spricka som skär deponeringshålet, en spricka som skär tunneln och så vidare). Denna metodik har använts inom den hydrogeologiska modelleringen i SR-Can /26-28, 26-29/. Annan funktionalitet som utvecklats är densitetsdriven

strömning i spricknätverk, matrisdiffusion av salt (som påverkar den densitetsdrivna strömningen) – dock enbart i kontinuummodeller, samt transport inklusive matrisdiffusion av olika vattentyper och/eller enskilda ämnen vilket möjliggör jämförelse med kemidata. Denna processmodellering har även använts inom platsmodelleringen beskriven ovan.

Även metodik för att simulera grundvattenflödet under glaciala förhållanden har utvecklats /26-30, 26-31/. En modell som beskriver flöden under en glaciärs uppbyggnad och avsmältning har utvecklats. Randvillkoren fås från en ismodell /26-32/, medan den hydrogeologiska modellen i regional skala baseras direkt på den platsbeskrivande modellen.

Bland övriga större studier som genomförts kan nämnas principstudier av öppna förvar /26-33, 26-34/. I den förra studien testades koden ConnectFlow för öppna förvarsstudier samt studerades vilka topprandvillkor som bör användas vid denna typ av simuleringar. I den senare studien analyserades vilken processkomplexitet som behövs för att simulera ett öppet förvar. Full tvåfasströmning, omäntad strömning samt mättad strömning med fri grundvattenyta jämfördes. Resultatet indikerar att för de flesta praktiska applikationer, kopplade till frågor på förvarsdjup, räcker angreppssättet med mättad strömning med en fri grundvattenyta. Detta är även det angreppssätt som använts i SR-Can-studierna som diskuteras ovan. För frågeställningar kopplade till det yt nära systemet bör dock en högre processkomplexitet, till exempel omäntad strömning, användas såsom i koden Mike She. Denna kod, eller motsvarande verktyg, behövs även i de fall då de eventuella effekterna på exempelvis specifika ytvattenobjekt, som inte kan representeras explicit i renodlade grundvattenmodeller, ska utredas.

Vid simulering av ett öppet förvar konstateras ofta att det simulerade flödet in i tunnarna blir högre än vad fältdata indikerar. Orsaken till detta kan till exempel vara tvåfasströmning eller en mekanisk påverkan, som resulterar i en hydraulisk förändring av berget närmast tunneln. En ytterligare förklaringsmodell har presenterats i /26-35/. Denna bygger på konceptet hyperkonvergens i kanalnätverk. Effekten uppstår i sprickigt berg där vattenflödet sker i kanaler som konvergerar in mot en tunnel. Den extra konvergens, kallad hyperkonvergens, som kanalerna ger upphov till förklarar det minskade vatteninflödet.

En storregional grundvattenmodellering av flödesförhållandena i östra Småland har utförts /26-36/. Denna studie har gjorts som ett svar på myndigheternas frågor beträffande tidigare storregionala studier som SKB utfört. Syftet har varit att utvärdera konceptuella förenklingar och modellosäkerheter vid en storregional grundvattenmodellering, samt att genomföra en fördjupad och förutsättningslös analys av flödesförhållandena i östra Småland. Resultaten indikerar att topografien betyder mest för det regionala flödesmönstret från förvarsdjup. Den topografiska undulationen har större betydelse än konduktivitetfältets egenskaper. Angående konduktivitetfältets egenskaper konstateras att djupavtagande och horisontell anisotropi dominerar över litologiska enheters, deformationszoner, diabasgångars och kvartära avlagringars påverkan på flödesmönstret.

En ny hydrogeologisk modell för Äspö har tagits fram med modellverktyget DarcyTools. Modellen inkluderar alla nya platsdata fram till 2005. Ett syfte har varit att inkorporera eller stämma av även mot kemiska data. Modellen ska användas som ett praktiskt verktyg vid planering av experiment och verksamheter i Äspölaboratoriet.

Transportresistansen, F-faktorn, längs med en flödesväg i en grundvattenflödesmodell påverkar den slutliga modellerade retentionen av lösta ämnen. Sprickornas geometriska egenskaper och flödet i sprickorna längs flödesvägen styr F-faktorn. Den lokala aperturvariabiliteten påverkar således också F-faktorn genom att det bildas kanaler i den enskilda sprickan. Dock brukar denna variabilitet försummas i modeller innehållande tusentals eller fler sprickor. I /26-37/ analyseras betydelsen av intra- respektive intervariabilitet i sprickor. Studien indikerar att variabilitet mellan sprickor dominerar den resulterande F-faktorfördelningen för typiska antagna värden på aperturvariabilitet inom respektive mellan sprickor. Vidare visar studien att den reduktion i F-faktorn som typiskt brukar användas i säkerhetsanalysen för att ta hand om kanalbildning är konservativt satt.

De två koderna ConnectFlow och DarcyTools vidareutvecklas och dokumenteras kontinuerligt. För ConnectFlow drivs utvecklingen via samarbetet inom ConnectClub där förutom SKB också Posiva (Finland), Nagra (Schweiz) och Obayashi (Japan) ingår. SKB driver vidare ett doktorandprojekt där ConnectFlow används, se vidare under Program nedan. DarcyTools har uppdaterats till version 3.0

och dokumenterats i /26-38/. Utvärdering av båda koderna sker inom både platsmodellering och Äspö Task Force GWFTS applikationer.

Program

Den utveckling som sker är starkt kopplad till koderna ConnectFlow, DarcyTools och Mike She. SR-Sites behov bedöms i stort vara tillgodosedda, men vissa bitar återstår, se nedan.

I ConnectFlow ska en ny rutin för så kallad partikelspårning utvecklas. Denna rutin, som inte har de numeriska problem som tidigare versioner haft, är viktig för användning av koden inom SR-Site. Vidare utvecklas metodiken för att inkorporera hydrogeokemiska data och kopplingen mot ytvattenbeskrivningen. Även arbetet med att nå en fullständig lösning för densitetsdriven strömning i DFN-modeller pågår. Den nuvarande lösningen, se exempelvis /26-39/, är approximativ. Slutligen sker viss utveckling av ConnectFlow inom Äspö Task Force GWFTS, där den nuvarande Task 7 går ut på att kvantitativt använda flödesdata från Posiva Flow Log-mätningar.

I DarcyTools pågår en utveckling av en förenklad metod för att beskriva hur återfyllda tunnlar återmätas. En första applikation av den föreslagna metodiken presenterades i /26-25, 26-26/. Metoden behöver verifieras ytterligare för att kunna anses fullt användbar för SR-Site. DarcyTools ska även användas för att studera hur ett öppet förvar påverkar uppströmning av salt vatten och den strömning som orsakas av den termiska lasten från förvaret. Slutligen pågår en utveckling av DarcyTools där Navier-Stokes ekvationer för strömning används. Möjliga applikationsområden för denna modifierade kod är injekteringsproblem och simulering av transport i sprickor med variabel apertur.

En viktig del vid den ythydrologiska modelleringen är att bestämma vattenbalansens huvudkomponenter och dess variationer i tid (från år till år och under enskilda år) och rum (mellan olika delar av modellområdet). Mätresultat från avrinningsstationer på platserna börjar nu bli tillgängliga och kommer sannolikt att vara betydelsefulla för att ytterligare förbättra de ythydrologiska modellerna i detta avseende.

Identifieringar av in- och utströmningsområden samt beräkningar av vattenutbytet mellan jord och berg är andra viktiga typer av resultat för vilka framsteg gjorts och där ytterligare förbättringar förutses när mer detaljerade avstämningar mot platsdata kunnat genomföras. Metodik för kalibrering och andra former av jämförelser med mätdata ska ytterligare studeras i ett modelleringsprojekt.

Viss kodutveckling kan även bli aktuell i Mike She. Detta gäller exempelvis möjligheten att med partikeltransport studera hur ämnen transporteras genom det kopplade grundvatten-ytvattensystemet.

En utveckling av en metod för att simulera grundvatten över en eller flera glaciationscykler ska utvecklas. Behovet av komplexitetsgrad bör utvärderas, samt konceptuella frågeställningar belysas. Beträffande konceptuella frågeställningar kan specifikt nämnas hur det subglaciala skiktet fungerar från hydraulisk synpunkt. Hur mycket smältvatten når berget under en glaciär? Vilken rumslig utbredning får permafrosten vid olika tidpunkter under den glaciala cykeln?

En platsspecifik applikation av hyperkonvergenskonceptet har påbörjats med syftet att bedöma metodens relevans för vidare användning i platsmodellering och säkerhetsanalys.

26.2.4 Gasströmning/gaslösning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att frågan om tvåfasströmning vid återmättnad av ett förvar bör studeras närmare. SKI understödde i sin granskning denna ståndpunkt, och konstaterade att det är bra att SKB avsåg att beakta tvåfasflöde i analysen av förvarets återmättnad, eftersom denna fas inträffar under den tid då en förhållandevis detaljerad analys av förvarets utveckling krävs. I sin granskning påpekade SKI även att SKB borde vara betjänt av ett verktyg för överslagsberäkningar av gastransport i geosfären.

Vidare ansåg SKI att SKB bör utreda om det kan finnas en koppling mellan gasströmning och kolloidtransport, eftersom kolloider kan ackumuleras i gränsskiktet mellan två faser. Denna fråga diskuteras i avsnitt 26.2.21.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Behovet av tvåfasströmning vid öppna förvarssimuleringar har utretts i /26-34/ och beskrivs i avsnitt 26.2.3. I SR-Can har återmättnadsförloppet analyserats med DarcyTools. Även detta beskrivs i avsnitt 26.2.3.

Förenklade beräkningar av gasströmning i geosfären har utförts inom SR-Can för både Forsmark och Laxemar /26-28, 26-29/. Den förenklade typ av modeller som myndigheterna efterfrågat kan sålunda sägas finnas framme.

Program

För återmättnad av tunnlar hänvisas till avsnittet 26.2.3. Som konstateras där är frågan inte slutligt utredd, utan viss utveckling fortsätter. Specifikt kommer metodologin att vidareutvecklas och appliceras mer plats-specifikt i SR-Site.

26.2.5 Rörelser i intakt berg

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisas utvecklingen och tillämpningen av strategin för platsbeskrivande modeller /26-40 till 26-44/ där de grundläggande frågorna handlar om att karakterisera bergets mekaniska egenskaper. I strategin ingår val av relevanta skalor för att kunna beskriva spänningstillståndet. En genomgripande översyn av metoder för spänningsmätningar och för att utvärdera dessa presenterades i Fud-program 2004 /26-45 till 26-49/. Vidare presenterades en systematisk översiktsstudie /26-46/, där spänningsvägarnas betydelse för belastning och rörelser i det intakta berget beskrevs. I studien jämfördes kriterier för olika typer av brott som kan utbildas i anslutning till förvarets hålrum. Rapporten visar speciellt att små mothåll, till exempel från tunnelåterfyllningen, kan vara av betydelse för att förhindra uppkomst och utveckling av spröda brott. Preliminära resultat redovisades för Apse-försöket (Äspö Pillar Stability Experiment) i Äspölaboratoriet /26-51, 26-52/. I försöket har studerats spänningar och deformationer på grund av utsprängning och termomekanisk belastning. Utifrån en detaljerad karakterisering har spänningar och deformationer modellerats. Dessa har sedan kunnat jämföras med mätdata.

Myndigheterna anser att utvärderingen och analysen av Apse-försöket bör bli mycket användbara, men att redogörelsen i Fud-program 2004 är väl kort. Man betonar att Apse-försöket är viktigt för att bedöma eventuella bergutfall kring deponeringshål och effekterna av bentoniten som förstärkning och broms mot bergutfall med tiden. Vidare anser myndigheterna att de plats-specifika aspekterna på bergets spänningar och hållfasthet behöver analyseras vidare.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

SKB har ytterligare utvecklat tekniken för att karakterisera bergets mekaniska egenskaper och tillämpat tekniken på undersökningsområdena i Forsmark och Laxemar för att ta fram platsbeskrivande bergmekaniska modeller.

SKB har testat platsmodelldata för Forsmark och Laxemar i numeriska närområdesberäkningar /26-53/ baserade på preliminära plats-specifika projekteringsförslag och på den generella så kallade Layout E /26-54/. Man fann att för givna in situ-spänningar och termomekaniska egenskaper hos de viktigaste bergdomänerna, är risken stor för termiskt inducerad spjälkning ett fåtal år efter deponering i torra deponeringshål där buffert och pelletfyllning inte tillräckligt snabbt tar upp vatten och utvecklar ett stabiliserande tryck på deponeringshållsväggen. Förutsatt att deponeringstunnlarna orienteras parallellt med den största huvudspänningen är risken för spjälkning i dessa under konstruktionskedet däremot liten.

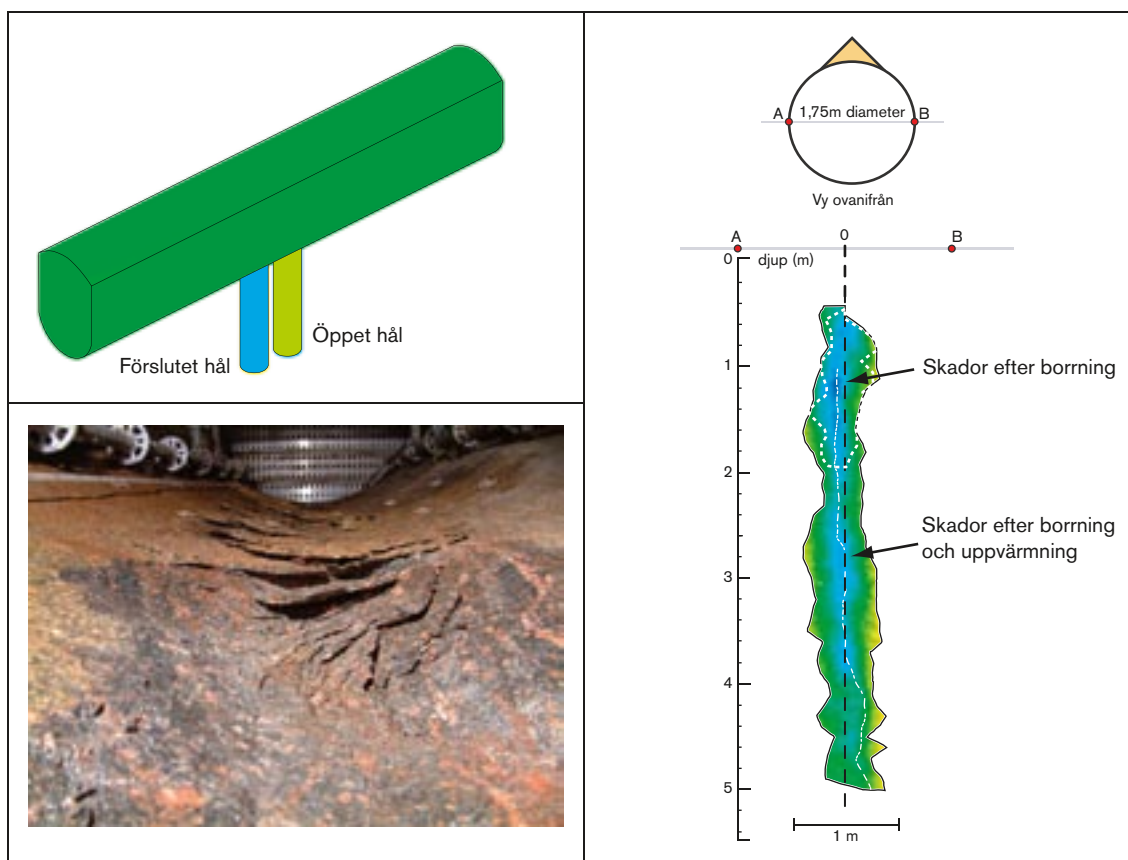
Apse-försöket i Äspölaboratoriet har slutförts och rapporterats, dels som en teknisk rapport /26-8/, och dels i form av en doktorsavhandling /26-55/. Försöket har i huvudsak gått ut på att genom uppvärmning utsätta en redan ansträngd pelare mellan två deponeringshål för successivt ökande last, så att tangentialspänningarna efterhand närmade sig och överskred det intakta bergets brotthållfasthet. I det först uttagna hålet installerades en gummiblåsa, i vilken ett litet stabiliserande tryck mot

hålvägen upprätthölls under uttag av det andra hålet och under uppvärmningsfasen. Figur 26-3 (övre vänstra) visar försöksgeometrin med de två närlägnade hålen i golvet av en tunnel med rundat golv.

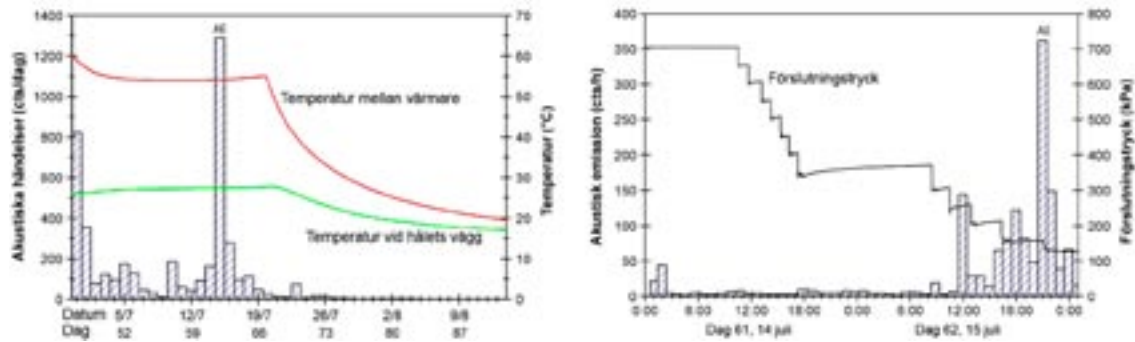
I det öppna hålet fick man spjälkning i en begränsad höjdsektion redan under uttaget. Brottet propagerade nedåt längs hålväggen efterhand som tangentialspänningarna ökade vid den följande uppvärmningen, se figur 26-3, höger. Figur 26-3 (nedre vänstra) visar brottets natur med dragsprickor parallellt med hålets periferi och skiviga fragment, som efterhand lösgjordes i den sektor av hålperiferin där tangentialspänningarna var störst.

I deponeringshålet, som stabiliserades med den trycksatta blåsan, observerades ingen spjälkning. Efter att brottet i det öppna hålet utvecklats som visas i figur 26-3 (vänster) reducerades det stabiliserande vattentrycket stegvis från cirka 700 ned till 0 kPa. När trycket nått cirka 200 kPa kunde man observera en ökning av den mikroseismiska aktiviteten i pelaren. Figur 26-4 (vänster) visar hur frekvensen av akustiska emissioner (AE) varierade vid slutet av uppvärmningsfasen. Maximumet vid dag 62 (den 15 juni) sammanfaller med tiden för trycksänkningen i det stabiliserade hålet. Figur 26-4 (höger) visar AE-frekvensen i detalj under trycksänkningen. Följande observerades:

- Spjälkningsbrott initieras som små periferiparallella dragsprickor i den periferisektor där tangentialspänningarna är störst och propagerar inåt tills brottet har en fått en kilformig självstabiliserande geometri. Detta är i överensstämmelse med observationer gjorda i AECL:s anläggning URL i Kanada.
- Brottets djup ökade inte nämnvärt vid successivt ökande tangentialspänning, se figur 26-5. Det maximala djupet var cirka 15 centimeter.
- Brotthållfastheten var cirka 57 procent av bergartens enaxliga tryckhållfasthet.
- Det lilla trycket från vattenblåsan (några hundra kPa) var tillräckligt för att undertrycka spjälkning i det stabiliserade hålet.

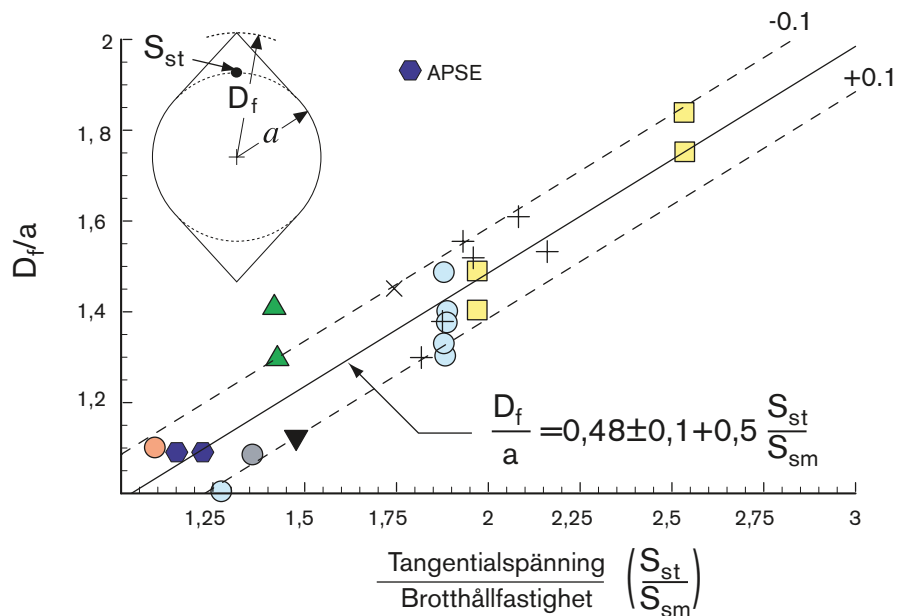


Figur 26-3. Övre vänstra: försöksgeometrin. Höger: brottets geometri och utveckling. Nedre vänstra: spjälkning efter borrar.



Figur 26-4. AE-frekvens (d^{-1}) i relation till temperaturen i två punkter på 3,5 meters djup (vänster) och i relation till trycket i det stabiliserade hålet (h^{-1} , höger).

Vid platsundersökningarna har omfattande fältinsatser för bergspänningsmätningar genomförts. Överbörningsmätning och hydrauliska metoder har tillämpats på båda platserna. Båda metoderna har begränsningar på större djup, speciellt i Forsmark (där bergspänningsnivån är högre) jämfört med Oskarshamnområdet /26-59/. Dock förefaller metoderna ge en tämligen samstämmig bild av spänningssituationen ner till nivåer omkring eller något över de studerade djupen för ett slutförvar, även om misslyckandefrekvensen för båda metoderna ökar med djupet. Överbörningsmetoden, som förutsätter att berget reagerar elastiskt när en kärna friborras, kan ha vissa problem med till exempel mikrosprickbildning. Vidare kan det på större djup ske brott tvärs kärnan på grund av den speciella mätgeometri som erfordras med en tunnväggig ihålig kärna. Därmed överskattas respektive omöjliggörs mätning. Hydrauliska metoder i ett anisotropt spänningsfält på större djup (förhöjda spänningmagnituder) tenderar att enbart orsaka flacka sprickor, på grund av att en spricka normalt induceras till den minsta huvudspänningen eller på grund av att sprickan inte går att inducera på större djup. Studier av indirekta observationer såsom "core discing" och "borehole breakouts", eller snarare bristen på dessa mot djupet, bidrar till att kunna gränssätta spänningsnivån /26-58, 26-59/.



Figur 26-5. Skadezonens djup som funktion av tangentialspänningen normaliserad till brotthållfastheten. Den successiva lastökningen i Apse-försöket gav bara en liten ökning av skadedjupet jämfört med fall där lasten etablerats direkt som en effekt av uttag. Från /26-8/ (baserad på /26-56/).

Studier av graden av mikrosprickor i borrhärnor, vilka troligen orsakas av spänningsavlastning när kärnan friborras, har utförts kontinuerligt inom ramen för platsundersökningarna. Analyser av resultat från Forsmark indikerar ett möjligt samband mellan minskande p-vågshastighet i borrhärnor mot djupet samt kvoten för formationsfaktorn mätt i laboratorium respektive in situ. Detta bedömdes bero på sprickbildning i samband med spänningsavlastning.

Program

Apse-försöket har visat på betydelsen av små mothåll för att stabilisera deponeringshålens väggar, där den termiskt inducerade ökningen av tangentialspänningarna skulle kunna leda till spjälkningsbrott (spalling). Ett projekt som är inriktat mot att närmare undersöka mothållseffekten kommer att genomföras, dels i form av ett fältexperiment dels i form av ett modelleringsprogram i samarbete med University of Alberta i Kanada. Fältförsöket får en utformning liknande Apse, men i mindre skala och utan den omfattande instrumentering som fanns i Apse. Speciellt undersöks inverkan av mothållet från en icke-vattenmättad pelletfyllning intill deponeringshålens vägg. Modelleringsprogrammets syfte är att utveckla modelleringstekniken och förståelsen för de grundläggande mekanismerna i allmänhet. Därigenom kan man bättre modellera observerade och dokumenterade spänningsinducerade brott, till exempel de som observerats i Apse och AECL:s anläggning URL i Kanada.

Ett program genomförs inom ramen för platsundersökningarna för att med hjälp av triaxiell belastning och mikroskopistudier kvantifiera graden av spänningsinducerade mikrosprickor i borrhärnor från några djup från Forsmark och Laxemar.

För att minska osäkerheten i bestämning av bergspänningsmätningar på stora djup, men framför allt för att få rationella metoder för beslutsunderlag vid dimensionering av bergförstärkning, avser SKB pröva andra metoder. Dessa går ut på att beräkna spänningstillståndet genom deformationsmätningar i samband med tunneldrivning. Utvecklingsarbetet är bland annat ett led i att få rationella verktyg vid tillämpning av den så kallade observationsmetoden i undermarksbyggandet (se del II, avsnitt 6.3.3).

26.2.6 Termisk rörelse

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Fud-program 2004 redovisade riskbedömning för kapselskador på grund av termomekanisk belastning. Denna risk är försumbar, förutsatt att man kan räkna med att inga kapselhål kommer att skäras av sprickor med en utsträckning som är större än 700 meter i stupningsriktningen /26-60/. Vidare informerades om att utvärdering och rapportering av SKB-insatserna med simulering av Febex-experimentet (inom Decovalex-initiativet) pågår.

Myndigheterna ansåg att det ännu inte har visats att kapselhål inte kommer att skäras av sprickor med en utsträckning som är längre än 700 meter i stupningsriktningen. Inte heller ansåg myndigheterna att SKB har demonstrerat att sprickor med en mindre utsträckning inte behöver beaktas i analysen av termomekanisk belastning. Vidare anser man att termiska rörelser i bergmassan som uppkommer i Prototypförvaret i Äspölaboratoriet bör tas till vara för kalibrering. En generell kommentar är att pågående experiment behöver avslutas och analyseras innan definitiva slutsatser kan dras om termiskt inducerade rörelser i bergmassan.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Temperaturutvecklingen i Apse-försöket har bakåträknats med uppmätta temperaturer och därefter har utvecklingen av termospänningar i pelaren mellan de två deponeringshålen beräknats /26-61/. Resultaten har sedan, genom att jämföra med den observerade utvecklingen av spjälkningsbrottet i ett av deponeringshålens vägg, utnyttjats för att bestämma ”spalling strength” i bergarten. Se även avsnitt 26.2.5 som kommenterar utvärderingen av Apse-försöket /26-8/ och närområdesmodeller.

Angående strukturgeologisk karakterisering och frågeställningar kopplade till termomekaniska belastningar hänvisas till avsnitt 26.2.7.

Program

Den analytiska termomekaniska lösning, som utvecklats av Claesson och Probert /26-62/, kommer att utvecklas vidare så att man kan analysera fall med flera olika deponeringsområden. De ursprungliga ekvationerna kommer att kodas till lätt användbara matematiska kalkylblad. Syftet är att lätt och snabbt kunna analysera effekter av att variera deponeringsgeometrin, effekter av tidsförskjutning mellan olika deponeringskampanjer och så vidare.

Den termomekaniska utvecklingen i Prototypförvaret kommer att analyseras med en metod liknande den som tidigare tillämpats för Apse-försöket /26-61/. Analysen kommer att baseras på den verifierade termiska analys som nu finns, det vill säga genom en noggrann beskrivning av hur effekten i de olika kapslarna varierat.

Det möjliga tryckberoendet hos den termiska expansionskoefficienten hos typiska bergarter i förvarsberget kartläggs, i första hand genom en litteraturstudie. Avsikten är att bedöma risken för att termospanningarna i förvaret underskattas på grund av att parametervärden bestämts genom försök på obelastade prover.

En utredning om karakterisering av mikrosprickor orsakade av termisk expansion samordnas med övriga insatser när det gäller tidsberoende deformationer och sprickdynamik, se avsnitt 26.2.9.

26.2.7 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 refererade SKB till diverse studier om spricksystemets roll för deformationer i närområdet vid tunneluttag och borrhning av deponeringshål /26-63/. Huvudslutsatsen var att spricksystem (av den typ som antogs i modellen) inte spelar någon avgörande roll rent mekaniskt, åtminstone inte när det gäller utbildning av brott i intakta bergblock eller det allmänna deformationsmönstret. När det gäller risken för smällberg är spänningarna och spänningarnas riktning i förhållande till tunnlar och hålrum viktigare än detaljer i sprickgeometrin, se även /26-52, 26-64/.

Vidare redovisades i Fud-program 2004 skjuvrörelser på grund av jordskalv. Tidigare (till exempel i SR 97) har seismiskt inducerade skjuvrörelser hos sprickor analyserats med en statisk, det vill säga en ickedynamisk, beräkningsmetod med statistiskt genererade skalv som ger rörelser i statistiskt genererade platsspecifika sprickpopulationer, innehållande sprickor av olika utsträckning och orientering. Frågeställningen har nu även analyserats dynamiskt med koderna Wave och Flac3D /26-65/. De dynamiska resultaten antyder att det statiska bidraget till den inducerade sprickrörelsen dominerar, åtminstone på de korta avstånd som kommer att vara viktiga för slutförvaret. För en spricka på några hundra meters avstånd är det inte det seismiska momentet, utan den lokala och förmodligen magnitudoberoende spänningsförändringen som är avgörande. En sammanställning av dokumenterade jordskalvsinducerade skador på undermarkskonstruktioner visar att effekterna, i form av dokumenterade permanenta deformationer, också i sådana fall där vägtunnlar eller järnvägs-tunnlar skär genom den aktiva zonen är begränsade till området allra närmast skalvet /26-66/.

Myndigheterna föreslog att de maximala förskjutningarna på grund av jordskalv redovisas i diagramform, där skalvets magnitud, avstånd från skalvcentrum och förskjutningsbelopp redovisas grafiskt. Det skulle då bli lättare att bedöma hur dessa parametrar varierar och hur de beror av varandra. Hänsyn borde därvid tas till storlek och riktning av sannolika spänningstillstånd. Man ansåg vidare att SKB:s slutsatser om sprickrörelser vid jordskalv med magnitud sex och större fortfarande är förknippade med osäkerheter. Detta kräver fortsatta insatser innan resultaten kan omsättas i ett hållbart koncept och användas i säkerhetsanalysen. Dessutom saknade myndigheterna förslag på studier som belyser och bestämmer de större sprickornas och sprickzonernas hållfasthet och deformationsegenskaper.

Kasam ansåg att seismiska mätningar och mätningar av in situ-deformation bör pågå under lång tid samt att GPS-mätningar i lokal skala bör återupptas i Oskarshamn och etableras i Forsmark. Vidare efterlystes den övergripande målsättningen för att bestämma respektavstånd till sprickzoner.

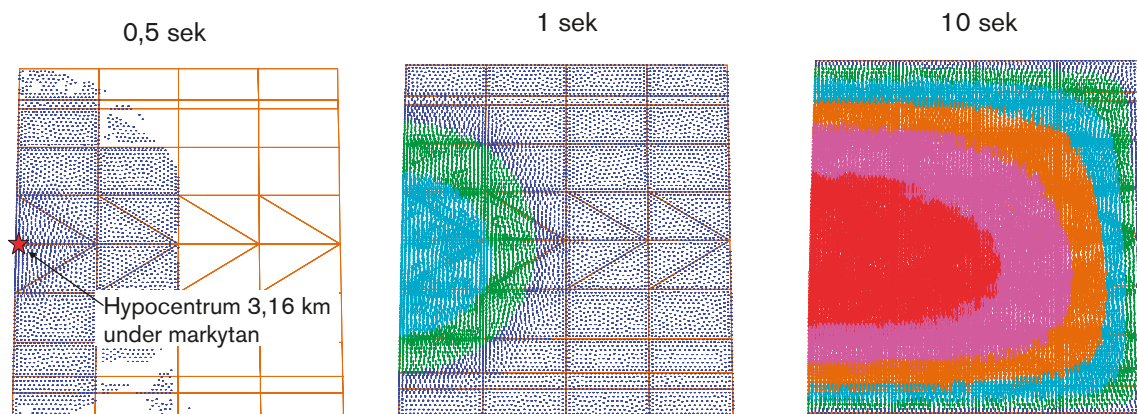
Nyvunnen kunskap sedan Fud 2004

En omgång beräkningar med den tvådimensionella distinkta elementkoden Udec har genomförts för att undersöka om förvaret kan uppträda som ett svaghetsplan. Resultaten visar att tunnlarna skulle behöva ligga tätare än 20 meter för att effekten av tunnlarna inte ska vara försumbar.

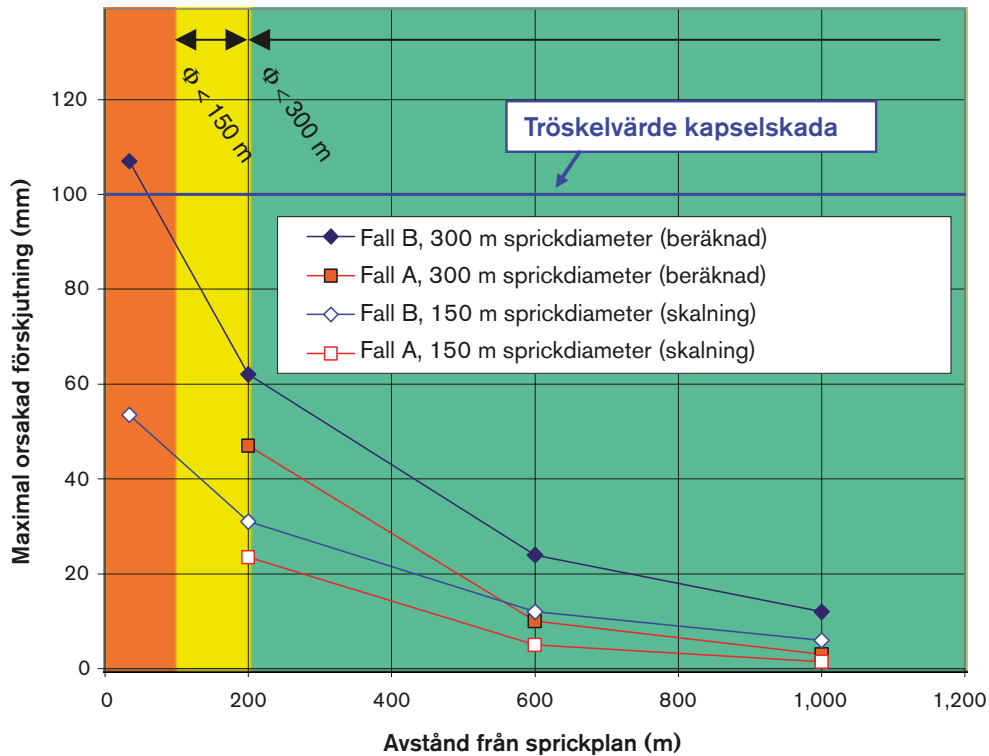
Angående effekter av jordskalv har dynamiska analyser genomförts med den distinkta elementkoden 3Dec /26-62/. Två olika skalvgeometrier analyserades: en där skalvet når en kilometer under markytan (Case A) och en där skalvet bryter genom markytan (Case B). I båda fallen var skalvet av magnitud sex. Skalvrörelsen utgick från ett givet hypocentrum cirka tre kilometer under markytan, så att brottet propagerade i skalvzonens plan med 70 procent av skjuvvågshastigheten i det omgivande elastiska berget, se figur 26-6.

Syftet med studien var att bestämma storleken av de sekundära skjuvrörelser som kan induceras i sprickor på olika avstånd från ett skalv. Ett stort antal cirkulära sprickor, ”target fractures” – alla med 300 meter i diameter, 34 graders friktionsvinkel och med konstant portryck av 5 MPa – definierades på olika avstånd från skalvzonen. Den möjliga skjuvrörelsen hos ”target fractures” i samband med seismisk aktivitet i närbelägna zoner är en av anledningarna till att kapslarna inte utan vidare får deponeras i hål som genomskärs av stora sprickor /26-65/. Figur 26-7 visar att den maximala beräknade skjuvrörelsen hos sprickor på 200, 600 och 1 000 meters avstånd från skalvet med god marginal blev mindre än en decimeter, det vill säga avsevärt mindre än nu gällande kapselskadegräns. Vid given belastning är skjuvrörelsen proportionell mot sprickans diameter, varför man kan omsätta resultaten direkt till motsvarande resultat för mindre sprickor, till exempel med 150 meters diameter. Som framgår av figuren är resultatet av studien att kapslar kan deponeras i kapselhål som genomskärs av sprickor med 300 meter diameter eller mindre om kapselhålets avstånd till ett möjligt skalv av magnitud sex är 200 meter eller mer. På mindre avstånd får skärande sprickors diameter inte vara större än 150 meter. Inom ett 100 meters respektavstånd deponeras inga kapslar oavsett beräkningsresultat. Skjuvrörelserna i figur 26-7 är de största som 3Dec-simuleringarna gav på de olika avstånden. De genomsnittliga rörelserna var avsevärt mindre. Figur 26-8 visar den maximala förskjutningen hos alla sprickor på 200 och 600 meters avstånd i de två 3Dec-modellerna.

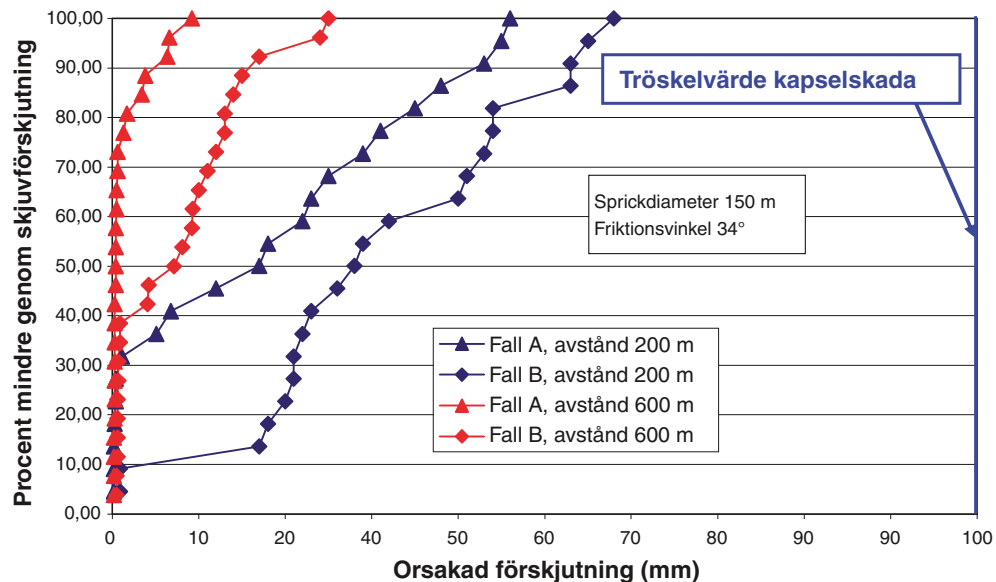
Resultaten – det vill säga avståndsbegränsningarna och sprickstorleksreglerna – bedömdes som giltiga också för större skalv, till exempel skalv av magnitud sju /26-62/. Ur flera aspekter, till exempel när det gäller det genomsnittliga förskjutningsbeloppet och den maximala skjuvhastigheten, var det simulerade skalvet i själva verket likvärdigt med skalv av magnitud omkring sju. På små avstånd är intensiteten avgörande, inte den aktiva zonen utsträckning eller den omsatta töjningsenergin. Det finns dessutom i beräkningsresultaten en betydande marginal till kapselskadegränsen, se figur 26-8.



Figur 26-6. Initiering och propagering av brott i dynamisk 3Dec-modell av jordskalv med symmetriplan i hypocentrum. Den totala brottarean är cirka 20 km² /26-62/.



Figur 26-7. Fyllda plotsymboler: beräknad maximal inducerad skjuvrörelse hos sprickor med 300 meters diameter på olika avstånd från skalv av magnitud sex. Ofyllda symboler: motsvarande resultat skalerade till sprickor med 150 meter i diameter. Figuren indikerar att kapslar kan deponeras i hål som genomskärs av sprickor med diameter mindre än 300 meter på 200 meters avstånd från potentiella skalvzoner. På avstånd mindre än 200 meter får de skärande sprickornas diameter inte vara större än 150 meter. Inom ett avstånd av 100 meter från den potentiella skalvzonen bör kapslar inte deponeras oberoende av beräkningsresultat.



Figur 26-8. Fördelningen av skjuvförskjutningen hos samtliga modellerade sprickor på 200 och 600 meters avstånd från ett skalv av magnitud sex.

Uppsala universitet har genomfört två studier som beskriver olika mekaniska effekter i jordskorpan av en glaciation liknande Weichselglaciationen /26-67, 26-68/. Båda studierna byggde på numerisk tvådimensionell modellering med finita elementkoden Abaqus. Den första studien /26-67/ avsåg skorpan stabilitet och förutsättningarna för skalv under tiden för isens avsmältning och tillbakaryckning. Den elastiska skorpan approximerades med genomsnittsegenskaper och antogs dessutom vara inkompressibel. Den andra studien avsåg spänningsutvecklingen på 500 meters djup i Forsmark och Laxemar och genomfördes med mer utvecklade skorpm modeller och för två antaganden beträffande Weichselglaciationens utveckling i tiden. Resultaten är framför allt relevanta för att definiera mekaniska randvillkor till närområdesmodeller, till exempel av den typ som analyseras i /26-53/.

Det internationella programmet Decovalex III har varit en fortsättning på det multidisciplinära samarbetet med syftet att utveckla modellverktyg för Termo-Hydro-Mekaniska (THM) processer i sprickigt berg och buffertmaterial. Decovalex III genomfördes under perioden 1999–2003. Fjorton finansierande organisationer, såväl myndigheter som industrirelaterade, deltog. Ett stort antal beräkningsaktiviteter genomfördes, bland annat ett så kallat Bench Mark Test (BMT3/WP4) med fokus på THM-effekter av glaciation och deglaciation. BMT3/WP4 har varit en generisk övning baserad på geologiska och hydrogeologiska förutsättningar från en plats i norra hemisfären (Whiteshell, Kanada), som förutsätts bli utsatt för en klimatdriven miljöpåverkan vid markytan. Modelleringarna har framför allt berört hydromekanisk påverkan av en glaciationscykel (upp till hundratusen år) på ett hypotetiskt förvar. Ett flertal olika scenarier och modelluppsättningar behandlades, till exempel permafrost, 2D- kontra 3D-konceptualisering, inlands- och kustnära förvar och havsnivåförändringar. SKB:s engagemang i BMT3/WP4 har huvudsakligen behandlat platsspecifik hydromekanisk modellering med fokus på grundvattnets trycknivåer, flöden, bergspänningar och sprickzoner förskjutningar, /26-69 till 26-71/. Även om de starkt förenklade konceptuella antagandena kan konstateras påverka resultaten, är slutsatserna bland annat att:

- Subglacialt grundvatten drivs till en del av berggrundens konsolidering under islast, vilket innebär att långvariga glaciationsscenarier bör ta hänsyn till hydromekaniska processkopplingar.
- Det yttnära randvillkorets förändrade beteende under lång tid innebär ett behov av transienta simuleringar för att man ska bedöma effekter av stora hydrauliska tryckpulser som påverkar lågpermeabla berggrundspartier.
- 3D-modelleringar bör genomföras, eftersom 2D-modelleringar överskattar möjligheterna till hydraulisk uppspräckning i slutna sprickor utan konnektivitet med andra sprickor.

”Differential SAR Interferometry” (Dinsar) är en teknik som jämför fasförskjutningar i multipla bilder från en radarsatellit över ett område. Avsikten är att kartlägga förändringar i markytan. Metoden har möjligheter att upptäcka millimeterförskjutningar (huvudsakligen vertikala) inom radarsensors synfält. Den samtolkade resulterande bilden kallas för ett interferogram med information som är relaterad till topografien och/eller till ytliga objekts deformation. Nya beräkningsalgoritmer kan använda ett flertal bilder, från olika tidpunkter över ett och samma område, för att bestämma rörelsehistoriken hos individuella objekt (stabila reflektorer) i området. En studie med denna nya teknik har genomförts för Forsmarksregionen. Det övergripande syftet är att kartlägga eventuella postglaciala rörelser i existerande sprickzoner. Ett antal av 40 stycken ERS-1 och ERS-2 satellitsscener från perioden 1992–1999 behandlades. Den totala studerade ytan var 1 500 km² och för analysen identifierades 20 000 stabila reflektorer, det vill säga berghällar och byggnadsdelar. En viss övervikt av de stabila reflektorerna förekommer i kustnära lägen där berggrunden går i dagen. Huvudresultatet är att inga rörelser under den studerade perioden har kunnat observeras i något regionalt lineament eller i någon sprickzon i Forsmarksområdet. Däremot identifierades ett flertal lokala sättningar i lösa sediment. De mest påtagliga sättningarna (maximalt cirka 25 millimeter under perioden) kan noteras i fyllnadsmassorna i de utbyggda pirarna utanför kärnkraftverken. Det bör påpekas att inga sättningar noterats för kraftverksbyggnaderna /26-72/.

De mekaniska egenskaperna hos en större deformationszon, Singölinjen i Forsmark, har uppskattats med stöd av numeriska simuleringar samt utifrån analys av deformationsmätningar som genomfördes när SFR:s tillfartstunnlar byggdes /26-73/.

Ett övergripande strukturgeologiskt karakteriseringsprojekt har genomförts. Fokus låg på att kvantifiera förekomst och utsträckning av sprickor och smärre deformationszoner i storleksordningen 100–500 meter /26-74/. Redovisningen av projektet diskuterar olika metoder med avseende

på lägesbestämningar, orienteringar och längduppskattningar av sådana strukturer under olika undersökningsskedet och konstruktionsskedet för ett förvar. Inom projektets ram har även tagits fram en metodik för att kartlägga potentiellt diskriminerande sprickor. Denna metodik bygger på sprickartering i tunnlår och tillämpning av DFN-modellering /26-75, 26-76/.

Program

Arbetet med att utveckla och analysera modeller av jordskorpanns stabilitetsförhållanden och spänningsutveckling under en glaciationscykel fortsätter. De modeller som analyserats tidigare har varit tvådimensionella och byggt på förenklade antaganden om hur skorpanns och mantelns egenskaper (kompressibilitet, täthet, viskositet etc) varierar med djupet. Härnäst är avsikten att studera en tredimensionell situation.

Arbetet med att studera förutsättningarna för hydraulisk uppspräckning fortsätter med modellering med simuleringskoden 3Dec.

De dynamiska simuleringar som hittills gjorts med 3Dec har avsett skalv av magnitud sex. Modelleringstekniken, det vill säga att styra brottutvecklingen med hjälp av 3Decs inbyggda programmeringsspråk så att brottet propagerar radiellt från ett antaget hypocentrum, kommer att modifieras. Vi ska kunna analysera, eller åtminstone gränssätta, effekter också av större skalv. Ett skalv av magnitud sju fordrar en modell som, räknat i antal element och gridpunkter, måste vara mellan en och två storleksordningar större än de modeller som hittills analyserats. Detta ligger utanför vad man praktiskt kan göra med dagens beräkningskapacitet. Modelleringstekniken kommer därför att modifieras så att jordskalvzonen representeras till fullt djup, men så att man trunkerar zonen vertikalt på några kilometers avstånd från hypocentrum. Inverkan av zonens utsträckning i strykningsriktningen, det vill säga effekter av rörelser i avlägsna delar av zonen, kommer därigenom inte att representeras helt korrekt.

De termomekaniska närområdesmodeller (Forsmark och Laxemar), som analyserats tidigare /26-53/ för att bedöma vilka transmissivitetsförändringar man kan förvänta sig hos sprickorna i närområdet vid bygge, termisk last och under en glaciationscykel, utvecklas för att överensstämna med layout och bergegenskaper enligt beskrivning i de uppdaterade layout- och platsbeskrivningarna.

De deformationszoner som finns i och omkring deponeringsområdena kommer att påverka närområdets termiska volymexpansion och därmed termospänningarna runt deponeringshål och deponeringstunnlar. För att gränssätta denna inverkan analyseras storskaliga 3Dec-modeller av platserna. De storskaliga 3Dec-modellerna används sedan för att ta fram relevanta mekaniska randvillkor till närområdesmodellerna.

Deformationsmätningarna med GPS-teknik (Global Positioning System) som initierades för Forsmarksområdet år 2005 kommer att fortsätta till och med år 2008. Målet med studien är att få ytterligare erfarenheter av tekniken med fasta GPS-stationer och kartlägga eventuella pågående berggrundsrorelser (främst horisontella) utmed de mest framträdande regionala deformationszonerna Singözonen och Forsmarkszonen.

26.2.8 Sprickbildning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 redovisades att allmänna aspekter på problemet med smällberg och stabilitet hos deponeringshållväggarna har behandlats i en översiktsstudie /26-50/. Speciellt belystes betydelsen av ett litet mottryck från bufferten för att förhindra initiering och propagering av brott som kan leda till smällberg. En separat sammanställning av geologiska, mekaniska och termomekaniska parametervärden för bergmassan kring Apse-försöket togs fram som underlag för bedömning av smällbergsförekomst vid termomekanisk belastning av Apse-pelaren /26-77/. Vidare redovisades diverse olika utvecklingsprojekt för beräkningskoder, till exempel Fracode och Particle Flow Code, med inriktning på sprickprocesser, men även beräkningsarbeten för termomekaniska simuleringar med Flac3D och JobFem. Resultat presenterades för beräkningskoden Examine3D (elastiska förutsättningar) och kan utgöra underlag för bedömning av vilka områden som kan komma i brotttillstånd. Det konstaterades att beräkningar med Examine3D kan betraktas som en plattform för att utveckla modeller för brott och sprickpropagering.

Myndigheterna ansåg att avsnittet som behandlar sprickbildning i Fud-program 2004 var viktigt och avvaktade modellresultaten från fortsatta tillämpningar av beräkningskoderna Fracod och PFC. Man konstaterade att SKB:s redovisning berör krypning i bergmassan, men att inget sägs om subkritisk sprickbildning, det vill säga sprickbildning som sker under långa tidsrymder och vid belastningar långt under normal brottgräns, se även avsnitt 26.2.9 om tidsberoende deformationer. Vidare ansågs att betydelsen av EDZ (Excavation Damage Zone) fortfarande är en öppen frågeställning som bör tas omhand. Myndigheterna ansåg att SKB bör ge en sammanhållen redovisning av sin syn på EDZ, dess effekter och betydelse för säkerheten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Apse-experimentet har till sina väsentliga delar utvärderats. Utveckling av tekniker för modellering av spröda brott och sprickpropagering har fortsatt; se tidigare avsnitt 26.2.5 om intakt berg.

Säkerhetsanalytiska aspekter på den störda zonen (EDZ) har behandlats inom ramen för SR-Can, se exempelvis /26-78, kapitel 13.6.6/. Enligt SR-Can innebär en störd zon med en och en halv storleksordnings högre konduktivitet än omgivande berggrunds inga säkerhetsmässiga problem. En grundläggande förutsättning är emellertid att tunneldrivningen sker enligt kvalitetssäkrad praxis.

Program

För planerade arbetsinsatser hänvisas till programbeskrivningen för intakt berg i avsnitt 26.2.5, se även avsnitt 12.5 och 12.7 i del III.

26.2.9 Tidsberoende deformationer

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 anfördes att återfyllningen i tunnarna inte kan bidra till att begränsa konvergens som beror på de långsamma kryprörelser som sker i berget inom några tunneldiametrars avstånd från tunneln. Den kan dock vara tillräcklig för att begränsa omfattningen av blockutfall och uppkomst och utveckling av progressiva brott i berget närmast tunnelväggarna /26-79/.

Myndigheterna ansåg att SKB:s föreslagna program är rimligt och att beräkningar av tidsberoende deformationer är av största vikt. Man kommenterade att det SKB hittills gjort är en litteraturstudie av normal krypning av bergmassor (rapporten var då tillgänglig enbart i preliminär form) men att det är en annan fråga, subkritisk sprickbildning, som kräver andra typer av analyser. Myndigheterna ansåg att SKB borde analysera inverkan av krypning både för sprickor och intakt berg samt redovisa betydelsen av subkritisk sprickbildning och dess tillskott av nya mikrosprickor som funktion av tiden /26-80,26-81/. Tillskottet av mikrosprickor över långa tidsrymder har betydelse för att bedöma hur permeabiliteten kring deponeringshål och tunnlar förändras.

Myndigheterna ansåg vidare att inverkan av subkritisk sprickbildning med sannolikhet är störst på platser med höga bergspänningar, som fallet är i Forsmark. Man ansåg att de höga spänningsmagnituderna på de föreslagna deponeringsnivåerna i Forsmark talar för att subkritisk sprickbildning kan komma att inträffa. Subkritisk sprickbildning är relaterad till den hastighet med vilken sprickbildningen sker och redovisas ofta i diagramform som sprickhastigheten som funktion av den brottmekaniska parametern brottseghet (benägenhet att brista). För bergmaterial gäller att brottsegheten avtar med minskad deformationshastighet. Ju långsammare deformationen sker, desto större är sannolikheten för brott. Så vitt myndigheterna kände till har dessa samband hittills inte studerats och testats av SKB.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

En litteraturstudie /26-82/ av tidsberoende deformationer i bergmassor, speciellt utmed sprickor av olika typ (fyllda, ofyllda), har genomförts och rapporterats. En av slutsatserna är att man kan förutsätta att förhållandet mellan spänning och hållfasthet måste överstiga vissa tröskelvärden för att någon krypning alls ska ske.

Program

Tidsberoende deformationer kopplar mot sprickdynamiska begrepp i allmänhet. En samordnad utredning initieras. Denna ska behandla och öka förståelsen för mikrosprickors uppträdande, subkritisk sprickbildning och krypning. Utredningen kommer även att omfatta olika aspekter på termiskt inducerade mikrosprickor.

26.2.10 Erosion

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Långsiktig erosion av geosfären har av SKB bedömts ha underordnad betydelse för slutförvarets långsiktiga funktion och säkerhet. Vissa uppskattningar av den glaciala erosionens omfattning framgår i litteraturen, se exempelvis /26-83/.

Myndigheterna kommenterade att SKB hänvisar till sitt klimatprogram som hanterar frågor som rör erosion. Emellertid framgår det inte vilka specifika studier som rör denna process. Behovet att SKB studerar och redovisar processens eventuella betydelse för ett slutförvars funktion kvarstår därmed. Myndigheterna påminde även om lämnade granskningskommentarer i samband med Fud-program 2001.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

En skattning av erosionsdjupet under kvartärtiden har genomförts på uppdrag av SKB /26-84/. Studien uppskattar en övre gräns för den genomsnittliga erosionen av berggrunden under en glacial cykel eller enskild glaciation. Studien bygger på antagandet att de minerogena sediment som bildats under kvartärperioden genom inlandsisarnas erosion av berggrunden finns kvar inom det område som tidigare varit nedisat. Medeldjupet av den glaciala erosionen av berggrunden skattades till mellan 0,2 och 4 meter under en hel glacial cykel. Om extremerna i gjorda antaganden utesluts kan den genomsnittliga erosionen under en glacial cykel skattas till cirka en meter.

Erosionsprocessen har även utretts inom ramarna för SR-Can (Processrapporten) där aktuell litteratur inom området redovisas och slutsatser dras om påverkan på förvaret. Frågan har även tidigare behandlats i den ovan refererade SKB-rapporten /26-84/. Under isfria perioder bedöms fluvial erosion vara den viktigaste denudationsprocessen. Den mest omfattande erosionen antas förekomma i samband med glaciationer och då endast under perioder med bottenmältande förhållanden hos inlandsisen. Den glaciala erosionen förekommer då framför allt i lägre delar av terrängen, såsom längs dalstråk. Erosionens omfattning är betydligt mindre över flacka urbergspartier. Resultatet av studierna visar att erosion av geosfären har en obetydlig inverkan på slutförvarets långsiktiga funktion och säkerhet.

Program

SKB kommer att fortsätta bevaka litteraturen inom området. SKB kommer även att samarbeta med Posiva för att sammanställa ytterligare genomförda studier, vilket är meningsfullt i och med de likartade geologiska och klimatologiska betingelserna i de aktuella områdena kring Bottenviken. Detta förväntas dock inte ändra bilden av att erosion av geosfären är försumbar vid en analys av förvarets funktion.

26.2.11 Advektion/blandning – grundvattenkemi

I detta avsnitt behandlas effekten av den blandning som uppstår genom att vattnet rör sig med varierande hastighet i bergets spricksystem och hur den processen påverkar grundvattenkemin. I avsnitt 26.2.12 behandlas betydelsen av advektion och dispersion för radionuklidtransport.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Blandningsmodeller för både Äspö och de undersökta platserna har utförts med hjälp av det statistiska dataprogrammet M3 /26-85/ och av grundvattenflödesmodellen DarcyTools. I viss mån har man lyckats utnyttja både hydrologiska och kemiska data till modeller av advektion/blandning

i stor skala. SKI påpekade risken med statistiska tolkningar av data, samt svårigheterna med alternativa tolkningar av grundvattenflödet. SKI uppmanade till att samla in och använda mer data, vilket borde resultera i bättre modeller och i sin tur främja paleohydrologiska tolkningar som kunde utnyttjas för att välja scenarier och bedöma säkerheten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

De nya data som har kommit fram inom platsundersökningsprogrammet har analyserats och platsmodeller har tagits fram /26-86, 26-87/. Dessa modeller har utnyttjat både grundvattenkemi och hydrogeologiska data, samt vår kunskap om paleohistorien vid platserna. Modellerna har använts inom säkerhetsanalysen SR-Can för att i detalj modellera grundvattenkemin under den tempererade perioden som följer slutförvarets förslutning /26-88/.

Datormodellen DarcyTools har uppdaterats och verifierats genom att modellera Äspös grundvattenflöde, se avsnitt 26.2.3. Datorkoden M3, som används för statistisk bearbetning med så kallad multivariatanalys, har utvecklats med stöd av SKB. Programmet har uppdaterats /26-89/ och en verifiering är på gång.

Program

Utvecklingen av modeller för grundvattenflöde beskrivs i avsnitt 26.2.3. Verifiering av den uppdaterade M3 kommer att avslutas inom de närmaste åren.

Inom platsundersökningarna kommer platsspecifika blandningsberäkningar att fortsätta vara viktiga för att få en djupare förståelse för vattnets utveckling på platsen. Beräkningar av salthaltens utveckling vid omfattande klimatförändringar över långa tidsintervall kommer att utföras inom ramen för SR-Site.

26.2.12 Advektion/blandning – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att inget specifikt program för advektion/blandning skulle sättas igång. Dock nämndes att frågan om advektiv transport med matrisdiffusion längs med transienta flödesvägar skulle studeras. Vidare nämndes att ett projekt för uppskalning av F-faktorn planerades.

Myndigheterna kommenterade inte denna process i sin granskning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Inget projekt har specifikt ägnats åt advektion/blandning. Dock kan konstateras att rapporten /26-34/, som diskuterats i avsnitt 26.2.3, indirekt även berör advektion då kanalbildning i sprickor med variabel apertur analyserats.

Projektet rörande uppskalning av F-faktorn och transport i transienta flödesfält hanteras i avsnitt 26.2.26.

Program

Den planerade versionen av DarcyTools som löser Navier-Stokes ekvationer för grundvattenströmning, se avsnitt 26.2.3, möjliggör även detaljerade studier av advektion i enskilda sprickor med variabel apertur. Frågor som till exempel kan belysas är dispersion/blandning i enskilda sprickor närmast kapseln. Även blandning i sprickkorsningar, Fracture Intersection Zones (FIZ), i ett nätverk kan studeras. Behovet av denna typ av simuleringar ska utvärderas innan detaljerade studier sätts igång.

I reaktiva transportmodeller, se avsnitt 26.2.26, är det ofta nödvändigt att få information om blandningsförhållanden. Detta kan i princip fås från en grundvattenflödesmodell. Problemet är dock att flödesmodeller ofta bygger på dispersion snarare än blandning. Ett behov finns sålunda att utvärdera skillnaden mellan blandning och dispersion i grundvattenflödesmodeller. Denna aktivitet kan bli aktuell om reaktiva transportmodeller ska användas i större omfattning.

26.2.13 Diffusion – grundvattenkemi

Detta avsnitt handlar om effekter av molekylär diffusion av grundvattenkomponenter globalt i ett mycket långt tidsperspektiv, samt hur processen påverkar de hydrokemiska förhållandena. Molekylär diffusion och matrisdiffusion samt dess betydelse för nuklidtransport behandlas i avsnitt 26.2.14.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Platsundersökningar i Finland och Sverige har visat att de grundvattenkemiska förhållandena på platserna är mycket likartade. I det övre partiet – ner till cirka 500 meters djup – förekommer meteoriskt vatten, gammalt havsvatten och glacialt vatten i varierande proportioner. Salthalten ökar mot djupet. På större djup än 500 meter tilltar salthalten ytterligare och vattnet bedöms ha en uppehållstid som vida överstiger 10 000 år. Detta tyder på att det ner till 500 meters djup pågår en dynamisk process styrd av inflöde av vatten från högre belägna områden och utflöde i lägre liggande områden. På större djup är grundvattensystemet opåverkat av denna dynamik. Om det dynamiska vattnet har en uppmätt uppehållstid av 1 000 till 10 000 år så är motsvarande värde för det stagnanta vattnet väsentligt längre. Slutsatsen är att det djupa salta vattnet, som är rörligt i ett geologiskt tidsperspektiv, kan anses stagnant i ett tidsperspektiv på 10 000 till 100 000 år. Det är möjligt att diffusionsprocesser påverkar saltfördelningen i grundvattnet i de djupaste bergvolymerna.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ingen ny kunskap i området har kommit till SKB:s kännedom.

Program

Detta område bedöms i dag inte kräva någon omfattande forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer. Till exempel kommer SKB att undersöka om det finns möjligheter att utnyttja data från Grönland, där det finns en tjock inlandsis, för att kontrollera modellerna för grundvattenflöde och saltfördelning vid sådana förhållanden. En preliminär sondering har inte uppdagat några sådana data.

26.2.14 Diffusion – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att Long Term Diffusion Experimentet (LTDE) i Äspölaboratoriet skulle starta under innevarande period, samt att doktorandprojektet om användning av elektriska mätmetoder för att uppskatta bergets formationsfaktor in situ skulle avslutas. Båda dessa mål har uppnåtts. Specifikt beträffande in situ-mätningar av formationsfaktorn konstateras att denna metod nu rutinmässigt används inom platsundersökningsprogrammet.

Myndigheterna lämnade inte några kommentarer på detta avsnitt av Fud-program 2004.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Under den senaste perioden har fokus på LTDE skiftat något. Experimentet har inriktats mer mot sorption än diffusion. Framför allt in situ-värden på sorptionskoefficienter (K_d -värden) eftersöks nu snarare än diffusionskoefficienter. Experimentet har följdriktigt döpts om till LTDE-SD där SD står för sorption-diffusion. Anledningen till denna förnyade inriktning är den kunskap som kom fram i datasammanställningarna för diffusions- och sorptionsvärden för SR-Can /26-90, 26-91/, där det konstaterades att de största osäkerheterna befanns föreligga för sorptionsvärdena. LTDE-SD diskuteras därför i avsnitt 26.2.17.

Vid platsundersökningarna har den elektriska resistivitetsmetoden använts för att uppskatta formationsfaktorn in situ längs med borrhål. I laboratorium pågår dessutom olika experiment med att mäta diffusion eller egenskaper som har betydelse för diffusion på platsspecifikt material. Resultat från mätningar av formationsfaktorn har rapporterats /26-92, 26-93/. Resultat från mätningar med diffusionsceller finns däremot inte framme ännu. In situ-mätningarna ger en möjlighet att studera den naturliga variabiliteten i formationsfaktorn inom en viss bergart, samt att studera

om det finns systematiska skillnader mellan olika bergarter och mellan de två undersökta platserna. Resultaten sammanfattas för de två platserna inom platsmodeller version 1.2 i /26-92, 26-93/.

För användning inom SR-Can har dataunderlaget för matrisdiffusivitet (diffusionskoefficienter) sammanställts /26-90/. I rapporten konstateras att de platsspecifika värden, som tagits fram med den elektriska resistivitetsmetoden in situ, är mer tillförlitliga än motsvarande laboratorievärden. Detta beror främst på den tryckavlastning som sker av proverna i laboratorium och som därmed resulterar i högre värden. Vidare fås ett mycket större dataunderlag från in situ-mätningarna. Generellt konstateras att data indikerar att det finns ett sammanhängande porsystem för matrisdiffusion, samt att detta porsystem i de undersökta fallen överstiger minst en meter.

Vid platsundersökningarna har man även analyserat matrisporvattnets sammansättning /26-94/. Genom att jämföra detta stagnanta vattens sammansättning med sammansättningen i det flödande vattnet i sprickorna kan en uppskattning av matrisdiffusionen göras. Om de två vattentyperna är i jämvikt är det en indikation på att matrisdiffusion är verksam. Metoden har utvecklats vid Äspö-laboratoriet inom projektet för att karakterisera matrisvattenkemin /26-99/, se även avsnitt 26.2.15.

Program

Under innevarande period kommer LTDE-SD-analyser att göras i laboratorium, samt slutrapportering att ske. Även om fokus ligger på sorption kommer förhoppningsvis även diffusionskoefficienter att erhållas. Försöket i fält är dock förkortat jämfört med tidigare upplägg så att det endast omfattar cirka sex månader. Vidare utförs diffusionsförsök på laboratorium för att kunna jämföra in situ-värden och laboratedata inom LTDE-SD med data från platsundersökningarna.

Även mätningar av matrisporvattnets sammansättning fortgår under slutskedet av platsundersökningarna. Målet är att kunna studera en eventuell diffusionsprofil från en flödande spricka in i det stagnanta vattnet i matrisen. Svårigheten är framför allt att vid borrning identifiera en spricka med lämpliga egenskaper och orientering för att sedan kunna ta ut bitar av borrhålskärnan för vidare lakningsexperiment.

26.2.15 Reaktionen med berget – grundvatten/bergmatris

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Interaktionen mellan bergmatrisens porvatten och grundvattnet sker huvudsakligen genom diffusion. Kemiska reaktioner kommer att ske huvudsakligen med sprickfyllnadsmineral. På lång sikt har dock reaktioner med bergets primära mineraler en ökad betydelse för grundvattnets kemi. Denna effekt är mest påtaglig i akviferer i sedimentära bergarter medan reaktionerna mellan berg och vatten i kristallint berg går långsammare.

Grundvattnets sammansättning i sprickor är ofta påverkad av både blandning och reaktioner. Matrisporvatten i kristallint berg har däremot endast studerats på ett fåtal platser /26-96, 26-97/. En slutsats från dessa arbeten är att matrisporvattnet kan ha betydligt högre salthalt än grundvattnet i omgivande sprickor och kan därigenom möjligen ha en negativ inverkan på de tillverkade barriärerna. Därför startades studier av matrisporvatten i Äspölaboratoriet (Matrisförsöket).

Vid Matrisförsöket /26-95/ har vi provtagit och analyserat vatten som befinner sig i porerna i berget. Resultat från experimentet visar att kontakten mellan matrisvatten och grundvatten i sprickorna sker genom långsam migration i ett nätverk av mikrosprickor som har små dimensioner och mycket låga hydrauliska konduktiviteter. Lösta ämnen transporteras inom bergmatrisen genom diffusion. Matrisporvattnet har bevarat bräckt vatten av okänd ålder. Baserat på mätningar av parametern $\delta^{18}\text{O}$ skulle dessa vatten kunna vara postglaciala eller från en tidigare glaciation. Försöket har visat att de flesta provtagningssektionerna har nått ungefärlig jämvikt mellan matrisporvattnet och det vatten som återfinns i de permeabla sprickorna. Men det finns också indikationer på att vissa bergvolymmer har ett mer stängt porsystem, som bevarat vatten med lägre salthalt. Slutsatsen från Matrisförsöket är att i de flesta sektionerna finns det bara en liten komponent i matrisvattnet som orsakats av långvariga reaktioner mellan berg och vatten. Resultaten visar att det inte finns någon anledning att misstänka att det finns något mycket salt matrisvatten på förvarsdjup i en miljö som liknar den i Äspölaboratoriet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Erfarenheterna från Matrisförsöket har överförts till platsundersökningarna. Provtagning och analys av matrisporvattnet har utvecklats markant och pågår. De befintliga resultaten har redovisats inom ramen för platsmodelleringen /26-94, 26-99/.

Program

Inom platsundersökningsprogrammet kommer provtagningar av matrisporvatten att fortsätta. Utvärderingen av dessa resultat kommer att vara av betydelse för SR-Site och för att bedöma eventuella framtida behov av ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

26.2.16 Reaktionen med berget – lösning/fällning av sprickmineraler

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Upplösning och utfällning av sprickmaterial är en ständigt pågående process. Den största andelen har bildats under hydrotermala förhållanden, men även lågtemperaturmineral förekommer. Dessa kan utnyttjas för att förstå grundvattenkemins utveckling, till exempel avseende redoxförhållanden.

Oxiderande förhållanden på försvarsdjup kan delas upp i två delproblem:

- Förvaret kommer att vara syresatt under byggnad och drift. En del syre kommer sannolikt att vara kvar i förvaret och dess närhet vid förslutningen.
- Farhågor har framförts om att syresatt grundvatten skulle kunna tränga ned till försvarsdjup under perioder med kraftigt förändrade hydrogeologiska betingelser, exempelvis i samband med en glaciation.

För att kunna utvärdera risken att glacialt smältvatten når försvarsdjup gjordes en genomgång av befintliga data från främst Äspölaboratoriet och Klipperås (förekomst av redoxkänsliga mineral etc) men även från andra platser /26-99/.

Både utvärderingarna av vattenkemi /26-85/ och sprickmineralogi /26-100/ visar att det finns klara indikationer på att komponenter av ett glacialt smältvatten har nått till stora djup (djupare än 500 meter). Men det finns inga spår som tyder på att detta vatten skulle ha varit syresatt under cirka 50 meters djup. Däremot finns det starka indikationer på att reducerande förhållanden har förekommit på djup under 100 meter under lång tid /26-100, 26-101/. Det vore därför olyckligt att knyta förekomsten av glacialt smältvatten till oxiderande förhållanden.

I Rex-projektet (Redox Experiment in Detailed Scale) i Äspölaboratoriet studerades hur syre som lämnas kvar vid stängningen av ett förvar kan reagera med mineral och grundvatten i berget runt tunneln och deponeringshålen eller längs de vattenförande sprickorna /26-102/. Resultaten från in situ-försöket bekräftades av replikaexperiment i laboratorium. Båda undersökningarna visade att syret hade konsumerats helt och hållet efter några dagar.

Utöver hastigheten för syreförbrukningen är den tillgängliga buffertkapaciteten av stor betydelse. Bufferkapaciteten för oorganiska reaktioner mellan syre löst i vatten och reducerande ämnen (tvåvärt järn och sulfid), i lösning och i sprick- och matrismineral kan uppskattas. Försök med vittring av sprickfyllnadsmineralet klorit har utförts /26-103/. Klorit är ett vanligt mineral i sprickor och förekommer dessutom som omvandlingsmineral i den omgivande bergmatrisen. Mineralen innehåller oftast signifikanta mängder av tvåvärt järn och bidrar därför till buffertkapaciteten mot intrång av syrehaltiga grundvatten. Då det gäller kapaciteten hos mikrober återstår en del grundläggande forskning, se avsnitt 26.2.18.

Equip var ett EU-projekt som pågick under 1997–2000 och som syftade till att utnyttja sprickmineral, främst kalcit, som indikatorer på nuvarande och tidigare grundvattenkemi /268-100/. Rent allmänt framstår kalcit som det mest användbara mineralet, då det kan bildas under mycket olika betingelser och dessutom ger information om vilken typ av grundvatten som kalciten bildats ur. Sammansättningen av isotoper och spårelement är därvid till hjälp. Även sulfidmineral och järnoxider eller järnoxhydroxider kan vara användbara vid tolkningen av redoxförhållanden. Uranserieanalyser från ler- och hematitrika sprickfyllnader från Äspölaboratoriet har utvärderats.

Resultaten stöder tolkningen att nuvarande redoxfront (övergång från oxiderande till reducerande förhållanden) inte når större djup än cirka 30 meter på Äspö /26-104/.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att även om ett scenario med förändrade redoxförhållanden på förvaringsdjup kan anses ha mycket låg sannolikhet, skulle nya modelleringsstudier kunna vara till nytta för SKB:s säkerhetsanalyser.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Egenskaperna hos sprickmineral kan vara användbara för att fastställa tidigare redoxförhållanden. Studier av kalciter inom EU-projektet Padamot har avslutats /26-105/. Projektet, som syftar till att studera järn(III)oxider på Äspölaboratoriet /26-106, 26-107/, håller på att avrapporteras.

Erfarenheterna från Padamot har överförts till platsundersökningarna och resultatet av sprickmineralstudierna finns tillgängliga som P-rapporter, till exempel /26-108, 26-109/.

Flera studier av vittringshastigheter av järnhaltiga sprickfyllnadsmineral har nyligen publicerats i litteraturen, till exempel /26-110, 26-111/.

Inom SR-Can har man utfört modellberäkningar för att visa hur djupt ett glacialvatten kan tränga ner. Förnyade modeller har också använts för att undersöka hur djupt syresatt glacialvatten kan nå innan syret förbrukats /26-112, 26-113/.

Program

Fortsatta försök med vittring av järnhaltiga sprickfyllnadsmineral är planerade inom den närmaste sexårsperioden. En fråga att klartlägga är förekomsten av mikrobiella processer vid laboratorieförsök.

Problemet med att åldersbestämma olika vatten/mineralprocesser är fortfarande inte löst. Därför är fortsatta mätningar av järn(III)oxider och uranserieanalyser planerade inom den närmaste tidsperioden. Även mätningar av spår av organiska molekyler, så kallade biomarkörer, kommer att utvärderas som indikatorer på tidigare grundvattenkemi.

26.2.17 Reaktionen med berget – sorption av radionuklider

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 nämndes att ytterligare en försöksuppställning i Äspölaboratoriet med uran och teknetium skulle genomföras inom aktinidprojektet som utnyttjar sonden Chemlab II.

I Fud-program 2004 konstaterades att det kan finnas behov av att utveckla processbaserade modeller för sorption. Vidare nämndes att ett licentiatprojekt för användande av elektriska metoder för att bestämma K_d -värden på intakta bergbitar skulle bedrivas.

Myndigheterna lämnade inte några specifika kommentarer.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Försöken i sonden Chemlab II med uran och teknetium är genomförda och rapporterade i /26-114, 26-115/. Cirka en procent av det injicerade teknetiumet återfanns i eluatet. Genombrottskurvan för denna fraktion följde den för tritierat vatten (HTO). Uran hade en viss fördröjning, där cirka 40 procent av uranet tog sig igenom, allt i hexavalent form. Resterande teknetium och uran återfanns bundna till samma – oftast järninnehållande – mineral i sprickan.

Elektriska metoder används för att uppskatta K_d -värden för sorption. I korthet går metoden ut på att öka inträngningen av ett spårämne i en bergbit med hjälp av elektromigration (elektrisk potentialgradient). För sorberande ämnen uppskattas att en ökning på två till tre storleksordningar kan uppnås. Preliminära resultat visar att det är möjligt att använda metoden för sorberande spårämnen. De uppskattade K_d -värdena är betydligt lägre än motsvarande K_d -värden uppmätta i batchexperiment /26-116/. Resultaten styrker således teorin att K_d -värden uppmätta i batchexperiment på krossat material överskattar sorptionen.

Inom den processororienterade sorptionsmodelleringen pågår två olika studier. Den ena studien behandlar prediktion av de batchsorptionsmätningar som utförs inom platsundersökningsprogrammet. Här används en ytkomplexeringsmodell för att prediktera de sorptionskoefficienter för nickel som uppmätts för ett prov av Ävrögranit från Laxemar. Genom antagen mineralogi och antagande om att nickel är det enda sorberande ämnet har K_d -värden för både salint och färskt grundvatten beräknats. De predikterade värdena stämmer förhållandevis väl överens med de experimentellt uppmätta för båda vattentyperna givet olika antaganden om magnetits andel av sorptionsytan (BET-yta) för de predikterade värdena. I ett andra projekt utnyttjas ytkomplexeringsmodellen för nickel från det första projektet för att ingå i en första test av reaktiv transportmodellering. Denna transportmodell ska kunna prediktera transport av nickel vid förändringar i grundvattenkemin, till exempel pH-värdet. Modellen innehåller för tillfället enbart sorption på ytor. Matrisdiffusion med sorption på inre ytor ingår inte.

Som beskrevs i avsnitt 26.2.14 har LTDE övergått till att bli i första hand ett sorptionsexperiment, LTDE-SD. Experimentet har satts igång i Äspölaboratoriet. Resultat kommer fram under 2007–2008, se nedan.

Inom platsundersökningarna pågår både batch-sorptionsmätningar och genomdiffusionsmätningar som ger K_d -värden för platsspecifika material. Vidare mäts K_d -värden på några hela bitar, samt ytterligare både CEC (cation exchange capacity) och BET-area (mått på tillgänglig yta för sorption) på ett antal prov. En del av resultaten har redovisats i /26-92, 26-93/.

I /26-91/ har en sammanställning av sorptionsdata för användning i SR-Can gjorts. I rapporten konstateras att det generellt är svårt att använda icke-platsspecifika data då olika experiment utförts på olika sätt och dokumentationen ofta är otillräcklig. Vidare konstateras att användandet av K_d -värden från batchsorptionsmätningar är behäftat med stora osäkerheter och förmodligen överskattar sorptionen då nya ytor skapas vid batchmätningar. Slutligen är inte heller utvärderingen av batchsorptionsmätningar trivial. Givet dessa svårigheter är det av intresse att kunna mäta på intakta bergsbitar, till exempel med den elektriska metoden beskriven ovan, samt att kunna utföra in situ-mätningar. LTDE-SD uppsättningen kan i ett förenklat utförande användas för att mer produktionsmässigt mäta K_d -värden in situ i ett detaljundersökningsskede i en tunnel.

Effekten av bakterier på sorptionsprocesser har undersökts och redovisats i /26-117/. I studien visas att en biofilm kan reducera bergets sorptionsförmåga. Detta gäller dock inte för trivalenta ämnen. En utökad diskussion kring dessa effekter och övrig kunskap beträffande mikrobiella processer redovisats i avsnitt 26.2.18.

Program

Doktorandprojektet om elektriska metoder för att mäta K_d -värden kommer att färdigställas under 2008. Givet uppnådda resultat kommer bedömning att ske om denna metod, eller en utveckling av densamma, kan användas produktionsmässigt under detaljundersökningsskedet.

Processororienterad sorptionsmodellering och reaktiv transportmodellering kommer att fortsätta under innevarande period. Specifikt kommer studierna beskrivna ovan att avslutas och rapporteras. Efter detta görs en bedömning över fortsatt utveckling och användning av denna typ av modellering.

Under innevarande period kommer analysfasen av LTDE-SD att genomföras i fält, analyser att ske i laboratorium, samt rapportering att ske. K_d -data kommer att erhållas från mätningar både in situ och i laboratorium. Detta ger en möjlighet till jämförelse. Relationen mellan laboratorie- och fältdata är viktig för att korrekt kunna tolka bland annat de laboratedata som kommer fram i samband med platsundersökningarna.

26.2.18 Mikrobiella processer

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Mikrober påverkar grundvattnets kemi genom att de påskyndar reaktioner som annars sker mycket långsamt. Främst påverkas redoxreaktioner, men även vittringsreaktioner kan katalyseras.

Forskning i Äspölaboratoriet och på andra platser har visat att olika typer av mikrober lever i urbergets sprickor. Vissa lever av organiska kolföreningar som följer med infiltrerande meteoriskt vatten från jordytan, medan andra kan leva av metan och vätgas från jordens mantel /26-118/.

Mikroberna i underjorden kan leva utan syre. En del är så känsliga för syre att de dör om ämnet förekommer i deras miljö. Många av de underjordiska mikroberna äger dock förmågan att konsumera syre, vilket bland annat Rex-försöken i Äspölaboratoriet visat /26-119/. När syre inte finns som oxidationsmedel kan olika mikrober i stället utnyttja andra föreningar, till exempel sexvärt svavel i sulfatjoner under bildning av sulfid(-II) eller trevärt järn i olika mineral som då löses ut till grundvattnet (i form av Fe^{2+}). Även fyrvärt mangan i brunsten kan användas av mikrober och löses då ut till grundvattnet (i form av Mn^{2+}). Åtskilliga mikrober i grundvatten bryter ner organiska kolföreningar till koldioxid för att få energi. Andra har vätgas som energikälla. Samtliga dessa grupper har påvisats allmänt i djupa grundvatten /26-120 till 26-122/. Tillsammans får mikrobernas livsföring i grundvattnet inflytande på den geokemiska miljön i bergets vattenfyllda sprickor.

Biologiska järnoxider bildas av bakterier när anaerobt järnhaltigt grundvatten når miljöer med syre. Det har länge varit känt att järn(III)oxider sorberar spårmetaller. Försök som har utförts i Äspölaboratoriet visar att retardationen av spårmetaller i biologiska järnoxider betydligt överstiger retardationen i oorganiska järnoxider /26-123/.

Mikrobiell syrekonsumtion i en spricka har modellerats /26-112/. Beräkningarna inkluderade också oorganiska processer, till exempel pyritoxidation. De utvärderade ett fall där en oändlig mängd syresatt vatten strömmar igenom en spricka. Modellresultaten visar att mikrobiella processer borde ha en stor effekt på kort sikt, men att oorganiska reaktioner tar över i långa tidsperspektiv.

SKI påpekade att SKB i första hand bör utvärdera processer som har en negativ påverkan på förvarets säkerhet, till exempel sulfatreduktion i närheten av deponeringshål, inverkan av komplexbildare från mikrobiell aktivitet, och begränsning av matrisdiffusion på grund av biofilmer. SKI konstaterade också att utnyttjandet av mikrobiella processer, som har en positiv inverkan på förvarets säkerhet (syrekonsumtion) vid säkerhetsanalyser, är starkt beroende av tillgången på matematiska modeller och dataunderlag.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Ett laboratorium på 420 meters djup i Äspölaboratoriet möjliggör fortsatta arbeten kring mikrober och deras betydelse i slutförvaret i ett projekt benämnt Microbe /26-124/. Borrhål har instrumenterats och grundvattnets kemi och mikrobiologi har karakteriserats och rapporterats. Sammansättningen av grundvatten och mikrobinnenhållet är relativt typiskt för grundvatten på detta djup. I laboratoriet finns möjlighet att arbeta anaerobt i en box. Flera system använder cirkulerande grundvatten, som tas från en spricka inne i berget. Detta gör det möjligt att studera mikrobiella processer under förvarförhållanden med avseende på kemi, tryck och temperatur. I laboratoriet finns en gaskromatograf och utrustning för gasextraktion installerad. Mätningar av gas kan ske direkt efter provtagning i laboratoriets odlingsystem eller efter provtagning längst tunneln. En serie olika experiment planeras på denna plats. Mikrobiella biofilmers effekt på sorbtion av radionuklider har undersökts med detta system /26-125/. Effekten är inte entydig. Flertalet av de undersökta radionukliderna (kobolt, prometium, americium, thorium, neptunyl(V) och molybdat) sorberades i lägre kvantitet på bergytan med biofilmer jämfört med rena bergytan. Prometium sorberades i högre halter på biofilm än på ren bergyta /26-117, 26-126/. Mikrobiella biofilmer kan således ha en negativ inverkan på matrisdiffusion /26-127/.

Metanoxiderande bakterier har påvisats förekomma allmänt nära jordytan i finska Olkiluoto på djup mellan 3 och 20 meter. De förekommer särskilt på djup där metan från underjorden möter syre från atmosfären. Liknande resultat finns från Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Metanoxiderare förekommer allmänt inne i återfyllnadsmaterialet, men kan däremot påvisas endast mycket sparsamt i det omgivande grundvattnet. Syrehalten i Prototypförvarets gasmiljö är betydligt lägre än i luft. Resultaten från dessa forskningsarbeten publiceras under 2007 och utgör tydliga kvalitativa bevis för att mikrober reducerar syre med metan i grundvatten.

Mikrobiell mobilisering av radionuklider med komplexbildare har undersökts i laboratoriemiljö. Tydliga mobiliseringseffekter har påvisats, främst i aerob miljö, men också under anaeroba förhållanden /26-128/.

Platsundersökningarna i Sverige, Äspölaboratoriet samt Posivas undersökningar i Olkiluoto har gett ett värdefullt tillskott av kunskap om förekomsten och utbredningen av olika mikroorganismer i djupa grundvatten. Av särskilt intresse är mikrobiella processer som leder fram till sulfid, eftersom denna har en negativ inverkan om den når kapseln. Samtidigt bidrar mikrobiell sulfidbildning allmänt till en låg redoxpotential i grundvatten. Sulfid kan bara bildas genom mikrobiella processer i det aktuella djupintervallet. Acetogena bakterier bildar acetat från vätgas och koldioxid. Sulfatreducerande bakterier bildar sulfid från laktat, eller acetat och vätgas. Båda dessa grupper av mikrober är allmänt förekommande i de undersökta grundvattnen. Acetogener hittades i 91 av totalt 99 undersökta prov och sulfatreducerare hittades i 78 av totalt 100 undersökta prov. Dessa resultat tyder på att sulfidproduktion från vätgas via acetat kan vara en viktig process i djupa grundvatten. Man har studerat processen /26-129/ på 450 meters djup i Äspölaboratoriet i slutna system med tillskott av vätgas. Resultaten visar tydligt att sulfid kan bildas snabbt av bakterier på förvaringsdjup. Koncentrationen kan bli hög under optimala förhållanden, särskilt i grundvatten med hög vätgashalt, till exempel från korrosion av järn, eller på platser där transporten av vätgas från mantelprocesser är hög. Resultaten ska användas för att beräkna sulfatreduktion och sulfidbildning nära deponeringshål.

Program

Forskningen om mikrobiella processer, som leder fram till bildning av sulfid, samt om mikrobers förmåga att reducera syre och buffra redoxpotentialen på en låg och för förvaret gynnsam nivå fortsätter. Arbetet utförs huvudsakligen på förvaringsdjup i Äspölaboratoriet under in situ-förhållanden med naturligt förekommande mikrober. Försök under kontrollerade förhållanden i laboratorium kommer också att utföras och följas upp i Äspölaboratoriet. Inverkan av bakteriofager (virus som angriper bakterier) utreds.

Mikrobiell mobilisering och immobilisering av radionuklider kvantifieras under olika förhållanden. Arbetet utförs huvudsakligen på förvaringsdjup i Äspölaboratoriet under in situ-förhållanden med naturligt förekommande mikrober. Inverkan av bakteriofager utreds.

Vi kommer att starta nya projekt med syfte att modellera mikrobiella processer som utnyttjar hittills erhållna resultat från platsundersökningarna, Olkiluoto och Äspölaboratoriet. Efterhand som forskningen i programmet genererar nya resultat tas de med i modelleringsarbetet. Modelleringen inriktas särskilt mot sådana mikrobiella processer som kan inverka negativt på någon barriärfunktion, till exempel sulfatreduktion. Även effekter av mikrober som inverkar positivt på förvarets säkerhet, till exempel konsumtion av syre och biosorption av metaller, kan komma att modelleras.

26.2.19 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Processen har betydelse för geosfären i ett initialt skede och i nära anslutning till förvaret, då förhållandena påverkas av utbyggnaden och av stål och cement i förvaret.

Ett in situ-experiment utfördes i Grimsel, Schweiz, med syfte att studera hur betongporvatten reagerar med bergmineral.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

I samarbete med Posiva har ett projekt startats för att utveckla och testa så kallade låg-pH-injekteringsmaterial, det vill säga injekteringsmedel som ska ha porvatten med pH lägre än 11. Detta beskrivs i del III, kapitel 12. Preliminära försök med lakning av dessa låg-pH-cementmaterial har utförts.

Program

Lakning av låg-pH-cement kommer att utföras med syfte att undersöka om organiska cementtillsatser kan lakas ur och om dessa kan påverka radionuklidsorption på berg. Vi kommer också att modellera degraderingen av dessa cementmaterial under långa tidsperioder.

Övriga oorganiska konstruktionsmaterial är huvudsakligen stål. Detta område bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

26.2.20 Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Kolloider är små partiklar som kan stanna i lösning under mycket långa tider. De kan således följa med grundvattnet och även fungera som bärare av radionuklider. SKB har i mer än tio år utfört studier och mätningar av kolloider. Slutsatsen från dessa studier, både nationellt och internationellt, är att kolloidinhållet i grundvattnet i svensk granitisk berggrund främst utgörs av ler-, kisel- och järnhydroxidpartiklar. Medelhalten är 20 till 45 ppb, vilket är lågt. Halten begränsas av att kolloiderna fastnar i sprickorna, vilket minskar deras stabilitet och transportkapacitet. I Nevada, USA, där hundratals underjordiska atombombstester har utförts, har mätningar visat att plutonium, kobolt och europium i grundvattnet spårats 1,3 kilometer från detonationsplatsen. Dessa mätningar indikerar en snabb kolloidtransport av plutonium, kobolt och europium, eftersom filtreringar av prover visade att samtliga ämnen förekom i form av kolloider. Troligen var kobolt och europium associerade med naturliga lerkolloider och plutonium i sig själv kolloidal.

Ett projekt utfördes i Äspölaboratoriet med syfte att klarlägga kolloiders förekomst, stabilitet, potential att transportera nuklider samt bentonitens potential att generera kolloider. Bentonitlerans roll som kolloidkälla undersöktes vid varierande grundvattenshalter (NaCl/CaCl) i laboratorieförsök. Man studerade bland annat kemiska förändringar, storleksfördelningar och effekterna från natrium- och kalciumrik bentonit.

SKI kommenterar i sin granskning av Fud-program 2004 vikten av studier med grundvatten med lägre jonstyrka. Vidare påpekade SKI att fältförsöken borde utformas så att kolloidtransportmodeller kan testas /26-130, 26-131/. Studier av växelverkan mellan radionuklider och kolloider rekommenderades.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Stabiliteten av bentonitkolloider i olika saltlösningar och temperaturer har studerats i laboratoriemiljö, se avsnitt 24.2.18. En studie har utförts för att undersöka hur bentonitkolloidernas stabilitet påverkas av uppvärmningen av bufferten. Studien visar att bentonitkolloiderna är något stabilare i högre temperatur i 0,001 M jonstyrka, vilket stöds av teoretiska beräkningar /26-132/. Vidare har kritiska koaguleringskonstanter (CCC) tagits fram för Na-bentonit och Ca-bentonit i kontakt med natrium och kalcium genom att studera sedimentationshastigheten. Mineralytors (krossad granit och kvarts) påverkan på bentonitkolloidernas stabilitet har studerats och indikerar att mineralytorna inte påverkar bentonitkolloidernas stabilitet i 0,001 M jonstyrka.

Hur radionuklider interagerar med kolloider och sprickfyllnadsmaterial i grundvatten från Äspölaboratoriet samt kolloidernas stabilitet har studerats på INE-FZK i Karlsruhe, Tyskland. Bentonitkolloider aggregerar momentant när de introduceras i grundvatten från Äspölaboratoriet. Påverkan av närvaro av bentonitkolloider, sprickfyllnadsmaterial och fulvosyra på radionukliderna strontium-90, cesium-137, americium-241, neptunium-237, uran-233 och plutonium-244 studerades i grundvatten från Äspölaboratoriet under tre månader. Strontium(II) och uran(VI) förblir opåverkade och sorberar inte till sprickmineral vilket däremot cesium(I) gör. Americium(III) och plutonium(IV) bildar instabila kolloidala species både i närvaro och frånvaro av bentonitkolloider. Experimentella data indikerar att naturligt organiskt material kan fungera som bärare av radionuklider, dock inte i de höga saliniteterna i grundvatten från Äspölaboratoriet i dag.

Kolloidtransport av latexkolloider och bentonitkolloider under olika förutsättningar har studerats i en väl definierad spricka i ett 1×1×0,7 meter stort granitblock i Kanada. Fördelarna med att undersöka transporten i detta granitblock är att både höga och låga flöden kan undersökas, sprickan är väldefinierad och efter försöken kan man undersöka var kolloider som inte kommit igenom befinner sig. Transportförsök med 100 nanometer latexkolloider samt bentonitkolloider i destillerat vatten visar att vid höga flöden (450 milliliter per timme) uppför sig latex- och bentonitkolloiderna på liknande sätt. Transporten går snabbt och det mesta tar sig igenom. Vid 45 milliliter per timme börjar skillnader att uppstå och vid 6,2 milliliter per timme skiljer sig transportkapaciteterna åt. Bentonitkolloiderna bromsas upp, men små mängder transporteras även i dessa utspädda vatten. Försöken bekräftar att latexkolloider kan användas som modellkolloid för bentonitkolloider i transportförsök i salta vatten vid höga men däremot inte vid låga flöden. Transportförsök med bentonitkolloider har också utförts i grundvatten i Äspölaboratoriet. Bentonitkolloiderna faller ut snabbt och ingen transport sker. Efter försöket spolades destillerat vatten in i sprickan, men ingen mobilisering av kolloider erhöles.

Dipolförsök med 50 och 100 nanometer stora latexkolloider har utförts på True-1-experimentplatsen i Äspölaboratoriet med pumpflöden på 300 och 780 milliliter per minut. Enligt försöken utfört i granitblocket kan latexkolloiderna representera bentonitkolloider vid dessa höga flöden, då bentonitkolloiderna inte i sig själva är stabila i dessa salta vatten. Även om osäkerheten i data är så stor kan man utläsa att transporten var snabb och återhämtningen stor. Eftersom osäkerheten är för stor kan inte filtreringskonstanter beräknas från dessa data.

Studier av kolloider under naturliga förhållanden i grundvattnet i Forsmark och Laxemar har fortsatt. Mätningarna visar att kolloidhalterna och sammansättningen liknar dem man finner i Äspölaboratoriet.

Program

Studier i laboratoriemiljö för att se i vilka typer av grundvatten och vid vilka temperaturer bentonitkolloider är stabila kommer att kompletteras. Bentonitkolloiders stabilitet vid låga till höga temperaturer undersöks också vid varierande jonstyrkor som komplement till den ovannämnda studien vid 0,001 M jonstyrka.

Sedimentationsförsök i jämförelse med försök att generera bentonitkolloider kommer att utföras på Paul Scherrer Institut (PSI) i Schweiz i samarbete med KTH. Syftet är att pröva om samma jämviktsskoncentration av bentonitkolloider erhålles även om man gör olika typer av försök.

Radionuklidtransport i närvaro av bentonitkolloider utfördes våren 2007 på INE-FZK i Karlsruhe, Tyskland, i en borrhäna från Äspö. Vi planerar också att undersöka möjligheten att utföra ett liknande försök i Äspölaboratoriet med en väl karakteriserad borrhäna i en handskbox kopplad till borrhål KA2512A.

Försök i Kanada med granitblocket planeras. Transporten av bentonitkolloider i låga flöden i vatten med låg salinitet studeras. Bentonitkolloiderna fraktioneras för att undersöka om man kan se filtrering på grund av storlek och för att se om monodispersa bentonitkolloider förändras under transport på grund av flockulering eller dispersionsprocesser. Möjligen kan även bentoniterosions-experiment utföras i granitblocket, men dessa försök bör samordnas med andra väldefinierade laboratorieförsök för att göra det möjligt att utvärdera data på ett kvalificerat sätt. Samtliga försök som utförts i granitblocket ska modelleras för att erhålla transport- och filtreringskonstanter för kolloider.

Vi undersöker också möjligheten i att delta i kolloidförsöket CFM i Grimsel, Schweiz, där bentonitkolloiders transport i utspädda vatten studeras.

26.2.21 Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 konstaterades att om spårämnesförsök med kolloider skulle utföras, så skulle även modellering av desamma ske. Vidare konstaterades att den nya numeriska versionen av Farf31 skulle kunna användas för att studera radionuklidtransport med kolloider.

SKI konstaterade i sin granskning att SKB har en mera fullständig och välutvecklad förståelse för kolloider jämfört med för några år sedan. SKI rekommenderade dock SKB att studera hur kolloider och radionuklider växelverkar.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

I projektet Colloid i Äspölaboratoriet studeras bentonitkolloiders stabilitet, interaktioner mellan bentonitkolloider och naturliga kolloider, samt sorption mellan aktinider och bentonitkolloider, se avsnitt 26.2.20.

Den nya numeriska versionen av Farf31 som kan hantera kolloider, Farf33, har publicerats /26-131/. Koden har verifierats genom jämförelse med både Farf31 och en kod som kan hantera kolloider, Collage II.

SKB deltar i EU-projektet Funmig där även kolloidtransport och radionuklidtransport med kolloider studeras.

Program

Colloid-projektet kommer att fortsätta såsom beskrivs ovan i avsnitt 26.2.20. Specifikt beträffande radionuklidtransport kan delprojektet Colloid actinide nämnas. Frågeställningen är om retentionen av aktinider minskar i närvaro av kolloider, det vill säga sorberar aktinider helst till bentonit (kolloider) eller till sprickmineral? En ytterligare fråga är huruvida aktinidkolloidkomplex är stabila. Experimenten ska utföras in situ i en borrhäla.

26.2.22 Gasbildning/gaslösning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Gaser som förekommer lösta i grundvattnet är av varierande sammansättning. Huvudkomponenterna är vanligen följande, ordnade efter sjunkande koncentration: kväve, metan, argon, helium, koldioxid, väte och kolmonoxid. Dessutom förekommer spår av andra kolväten så som etan, eten, acetylen, propan och propen. Den totala mängden löst gas per liter undersökta i svenska grundvatten pendlar mellan cirka 30 och cirka 100 milliliter, på djup ned till en kilometer under markytan. Dessa mängder ligger betydligt under löslighetsgränserna för de påträffade gaserna vid gällande tryck på respektive djup. I grundvatten som provtagits i Olkiluoto, Finland, har högre gasmängder påträffats, upp till 300–400 milliliter gas per liter grundvatten /26-120/. Här har gasen också en avvikande sammansättning.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Databasen över lösta gaser i grundvatten byggs kontinuerligt på /26-118/, dels med data från grundvattnen runt Äspölaboratoriet och dels med data från grundvattnen vid platsundersökningarna.

Utrustning för gasanalys i grundvatten har installerats under jord i Äspölaboratoriet och i ett laboratorium vid Göteborgs universitet, där forskning om lösta gaser i grundvatten pågår. Nya metoder har utvecklats för extraktion och analys av samtliga förekommande gaser. Forskning pågår kring gasernas inverkan på förekomst och aktivitet hos mikroorganismer samt mikroorganismernas påverkan på innehåll och sammansättning av gaserna. Dessa undersökningar finns redovisade i avsnitt 26.2.18.

Program

Utrustningen för provtagning av gas och gasanalys kommer att fortsätta utvecklas, provtagning på platserna likaså. Studier för att förstå ursprunget och transporten av metan och väte är av vikt för säkerhetsanalyser av slutförvaret. Diskussioner pågår om möjligheten att analysera ädelgaser från platsundersökningarna. Detta görs i syfte att få information om infiltrationstemperaturerna hos de olika vattentyperna.

26.2.23 Metanisomsättning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Vid låg temperatur och högt tryck bildar vatten och metangas en fast fas som kallas metanis. Metanis kan till exempel bildas under permafrost och har studerats i olika geologiska miljöer: kristallint berg, som till exempel i Kanada /26-133, 26-134/, sedimentära bergarter i Ryssland /26-135, 26-136/ och också i havssediment, till exempel i Kanada /26-137/. En genomgång av kunskapen på området gjordes /26-138/.

SKB startade tillsammans med forskare från Finland och Kanada studier av en guldgruva i ett permafrostområde i Kanada (Lupingruvan).

SKI anser att kunskapen om metanisbildning och saltutfrysning behöver förbättras och det är svårt att bedöma om undersökningar av guldgruvor i permafrostområden kan bidra med den nödvändiga kunskapen.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Studierna som SKB startade i Lupingruvan slutfördes /26-133, 26-134/. Ingen metanis påträffades.

Program

För att förstå metanisbildning krävs kunskap om metanets ursprung och möjligheter att transporteras. Studier i permafrostområden kommer att fortsätta i andra gruvor i Kanada (High Lake, Nunavut Territory). Även undersökningarna av porvatten- och grundvattenkemi vid platsundersökningarna kan bidra till att spåra djupet av tidigare permafrost och metanisbildning.

26.2.24 Saltutfrysning

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Då saltvatten fryser långsamt tvingas lösta ämnen (salter) ut i lösning. Processen kan ha betydelse i samband med kallt klimat, till exempel under en period med permafrost.

En av de huvudsakliga indikatorerna för att spåra saltutfrysning är förekomsten av sulfatrikt vatten, som har bildats genom upplösningen av mirabellit. Andra indikatorer är mycket låga värden på parametrarna $\delta^{18}\text{O}$ och $\delta^2\text{H}$ som uppstått i samband med saltutfrysningen /26-134/, fraktionering av borisotoper (höga $\delta^{11}\text{B}$ -värden /26-139/) och också bildningen av kalciter med höga $\delta^{13}\text{C}$ -värden /26-140/. Den dynamiska grundvattensituationen i samband med deglaciationen och de påföljande variationerna i havsytans höjd längs Östersjökusten har lett till en blandning av olika grundvatten, vilket gör att det är mycket svårt att urskilja det vatten som eventuellt bildats som ett resultat av saltutfrysning. Undersökningar i Lupingruvan i permafrostområdet i Kanada har inte kunnat påvisa effekten av saltutfrysning.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Om saltutfrysning sker, kommer de salta vattnen att röra sig mot djupet på grund av sin större densitet och läggs till de salta grundvattnen som redan finns på dessa nivåer. Det är därför inte troligt att man kan hitta ansamlingar av salt grundvatten under lager av permafrost. Inom säkerhetsanalysen SR-Can har man utfört generiska modellstudier med syfte att undersöka om utfrysade salter under ett permafrostlager skulle kunna påverka återfyllningens svällförmåga. Beräkningarna visar att det salta grundvattnet rör sig snabbt nedåt i transmissiva sprickzoner på grund av sin högre densitet. I bergvolymen med låg hydraulisk konduktivitet är det salta grundvattnet relativt orörligt.

Program

Undersökningarna i gruvor i permafrostområden kommer att fortsätta. Se också avsnitt 26.2.23 ovan. Ytterligare modelleringsstudier är planerade inom SR-Site.

26.2.25 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling

Grundvattnets sammansättning har – i kombination med grundvattenflödet – stor betydelse för slutförvarets funktion, både på kort och på lång sikt. Växelverkan mellan de tillverkade barriärerna och grundvattnet bestämmer hur länge det använda kärnbränslet kommer att förbli isolerat. Även i en situation då isoleringen brutits har grundvattnet en avgörande betydelse för upplösning och transport av radioaktiva ämnen i bränslet. Säkerhetsrapporten SR-Can är ett bra exempel där grundvattnets betydelse för slutförvarets säkerhet framhävs.

Hydrogeokemiprogrammet i platsundersökningarna syftar till att beskriva grundvattnets kemi i slutförvarsvolymen och dess omgivning ur ett säkerhetsanalytiskt perspektiv och ge det kemiska underlag som krävs för att projektera slutförvaret. Generellt bidrar SKB:s geokemiprogram till en övergripande förståelse för hur grundvattensystemet fungerar på förvarsdjup. Hydrogeokemiska och hydrogeologiska data ger tillsammans en beskrivning av vattenomsättningen inom förvarsområdet och dess påverkan på grundvattensammansättningen, samt hur denna varierar i den tillänkta förvarsvolymen.

Den enklaste hydrokemimodellen är en fördelning i rymden av halterna av de viktigaste lösta ämnena i bergvolymen. Vanligtvis undersöker man fördelningen av huvudkomponenterna natrium, kalium, kalcium, mangan, klor, sulfat och vätekarbonat inklusive pH, men att även ta med de stabila och radioaktiva isotoperna deuterium, syre-18, svavel-34, kol-14, kol-13, tritium och strontium-87 är av stort värde. Fördelningarna av de enskilda lösta ämnens halter kan i vissa fall indikera specifika pågående kemiska processer.

Mer kunskap nås genom en statistisk bearbetning med multivariat analys, som ger en uppdelning i olika klasser. De olika klasserna representerar vatten som genomgått en viss utveckling. Genom att jämföra de olika klasserna kan deras olika utvecklingsvägar identifieras, oavsett var i volymen de förekommer. Inom varje klass definieras ett så kallat typvatten som får representera den klassen. Typvatten utgör sedan en grund för fortsatta beräkningar av reaktioner och blandningsförhållanden. I dessa beräkningar kan mätdata för till exempel de tio viktigaste komponenterna ingå /26-85/. De framräknade blandningsproportionerna och den verkliga uppmätta sammansättningen utgör grund för att beräkna omfattningen av kemiska reaktioner. Man antar då att en avvikelse i halten hos någon av de ingående komponenterna är resultatet av en kemisk reaktion som inträffat efter det att vattnet blandats. Det kan vara fråga om upplösning eller utfällning av olika mineral eller mikrobiella processer som genererar till exempel sulfid, karbonat, tvåvärt järn med mera. För denna hydrokemiska modellering används koden M3 (Mixing an Mass balance Modelling) som har utvecklats med Matlab som bas, se avsnitt 26.2.11. Resultatens rimlighet kontrolleras med alternativa modelleringar, till exempel geokemiska simuleringar med koden PhreeqC.

En ständigt återkommande fråga är om grundvattenproverna verkligen representerar grundvattnet på det djup där de tagits. Studier av sprickmineral kan bidra till att utvärdera det hydrogeokemiska systemets stabilitet och representativitet. EU-projekten Equip och Padamot /26-100, 26-105/ har haft som huvudsaklig uppgift att föreslå lämpliga metoder för att samla in palaeohydrologisk information, det vill säga samla information från sprickmineral om nuvarande och tidigare vattenkemi. De undersökningar av sprickmineral som gjorts i Äspölaboratoriet indikerar en uppdelning i tre olika zoner, där zonen under 800 meters djup förefaller vara relativt isolerad.

På senare tid har kunskapen om de mikrobiella processerna ökat /26-86, 26-87/. Det har visat sig att dessa har stort inflytande på den hydrogeokemiska utvecklingen och därmed på den hydrogeokemiska tolkningen.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Data som har tagits fram inom SKB:s tidigare typområdesprogram samt i Äspölaboratoriet (från 1980 fram till 2001) har modellerats. Blandningsmönstret har gett en bild av vilka förändringar i grundvattensammansättningen som kan förväntas i framtiden /26-141/. Under den kommande 1 000-årsperioden förväntas dagens situation i stort att råda. I ett 10 000-årsperspektiv kommer landhöjningen och eventuella klimatförändringar att ge förändringar som kan beräknas med tillgängliga hydrogeologiska och hydrokemiska modeller. I ett 100 000-årsperspektiv avgör antaganden om då rådande klimatförhållanden helt vilken situation som kan tänkas förekomma. I detta tidsperspektiv är det meningsfullt att identifiera vilka klimatsituationer som kan förorsaka de största förändringarna och analysera effekterna av dessa.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att SKB behöver andra modeller än M3 för att förstå processer som involverar reaktiva komponenter i grundvattnet. SKI påpekade också att geokemisk information bör användas för att dra slutsatser beträffande in- och utströmningsområden samt beträffande flödesriktningar i lokal och regional skala.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Hydrokemiska modeller har tagits fram för båda platserna. Modellerna inkluderar både blandningsproportioner och jämviktsreaktioner med sprickfyllnadsmineral /26-86, 26-87/. Det ursprungliga M3-programmet har vidareutvecklats /26-89/. Hydrogeologiska modeller för platserna har använt kemidata som en del av kalibreringen /26-17, 26-18/. Dessa modeller har sedan använts tillsammans med en modell för mineralreaktioner i SR-Can för att ge en detaljerad bild av grundvattenkemin under den tempererade perioden efter förvarets förslutning.

Program

Det finns inga planer på metodutveckling inom området. Tillämpning av metodiken sker inom ramen för platsundersökningsprogrammet samt säkerhetsanalyserna.

26.2.26 Integrerad modellering – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 nämndes att Task 6 inom Äspö Task Force MGFTS pågick, samt att viss modellutveckling för radionuklidtransport inom säkerhetsanalysen också skedde. Vidare nämndes fältförsöken True Block Scale Continuation samt True-1 Continuation.

SKI konstaterade i sin granskning att SKB:s program vad gäller modeller för radionuklidtransport är ändamålsenligt och att man har ett ambitiöst program beträffande fältstudier. Vidare påpekades att SKB:s aktiviteter på området geosfärtransport stämmer med resultaten från EU-projektet Retrock.

Specifikt konstaterade SKI att det är positivt att SKB utvecklar modeller för att kunna ta hänsyn till heterogenitet utmed transportvägarna i berget. SKB bör dock utreda i vilken utsträckning data kan erhållas vid platsundersökningarna för att göra det möjligt att inkludera heterogenitet och variabilitet hos retentionsparametrar. I de fall platsspecifika data inte kan tas fram bör SKB redovisa vilka osäkerheter detta leder till och hur dessa osäkerheter kommer att tas omhand i säkerhetsanalysen.

Slutligen ansåg SKI att det arbete som utförs inom ramen för Äspö Task Force MGFTS (Task 6) ger ett värdefullt bidrag för att öka kunskapen inom området radionuklidtransport.

SSI konstaterade i sin granskning att det är bra att SKB vidareutvecklar sina modeller för transport av radioaktiva ämnen. Det blir då lättare att ta hänsyn till varierande egenskaper utmed transportvägarna i berget. Dock bör SKB klargöra behovet av platsspecifik information såsom fördelningskoefficienter, matrisporositet och effektiv diffusivitet. SKB bör även redovisa vilka osäkerheterna är och hur dessa kommer att tas omhand i säkerhetsanalysen.

SSI konstaterade även att det är viktigt att SKB verifierar och dokumenterar nyutvecklade modeller innan de används för kommande tillståndsansökningar. Vidare påpekades att SKB bör utreda betydelsen av de förenklingar som säkerhetsanalysmodellerna är förknippade med, till exempel vad gäller sorptionskinetik, endimensionell beskrivning av flervägstransport och kolloidal transport. Slutligen konstaterade SSI att man ser positivt på att SKB börjat utreda transportprocesser i övergången mellan geosfär och biosfär samt hur detta ska tas in i kommande säkerhetsanalyser.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

De så kallade Tracer Retention Understanding Experiments (True) har pågått under hela föregående period. Inom projektet True-1 Continuation har specifikt följande aktiviteter pågått:

- Fault Rock Zones Characterisation.
- Complementary laboratory sorption experiments.
- True-1 Scientific papers.
- True-1 Completion.

Inom aktiviteten Fault Rock Zones Characterisation undersöker man, förutom mineralogi och hydrauliska egenskaper, även porstruktur och in situ-porositet av breccia- och gougematerial, det vill säga av olika sprickfyllnadsmaterial. Även injicering av epoxy med efterföljande överborrning och bildanalys av porstrukturen ingår. De komplementära sorptionsexperimenten i laboratorium syftar till att experimentellt verifiera tidigare använda, beräknade sorptionskoefficienter (K_d -värden). Denna aktivitet är relaterad till de aktiviteter som beskrivs ovan i avsnitt 26.2.17. Sorptionsmätningarna görs på olika typer av sprickfyllnadsmaterial. Feature A är den spricka i vilken alla spårämnesexperiment inom projektet True-1 har genomförts. True-1 Completion syftar till att karakterisera den interna strukturen och sorptionsiteterna i Feature A. Karakteriseringen omfattar komplementära spårämnesförsök, epoxyinjicering och överborrning inklusive analys.

Spårämnesförsöken består av så kallade Swiw-tester (single hole injection-withdrawal), flödestester enligt metoden reciprocal cross-hole, samt CEC-tester. Eftersom Feature A är penetrerad av flera borrhål kan spårämnena monitoreras i övriga borrhål då Swiw-försök utförs i ett enskilt hål. Detta, samt information från flödestesterna, syftar till att ge information om bland annat kanalbildning i Feature A. CEC-spårämnesförsöken syftar till att uppskatta katjonutbyteskapaciteten för en naturlig spricka samt att studera reversibiliteten av cesiumsorption. Efter hela denna karakteriseringsomgång ska den mikrostrukturella modellen uppdateras. Slutligen ingår i projektet True-1 Continuation att publicera vetenskapliga artiklar som sammanfattar SKB:s insatser inom detta område.

Inom projektet True Block Scale Continuation har fasen BS2 pågått. I denna fas har specifikt retentionsegenskaperna i en bakgrundsspricka respektive i en större struktur (zon) undersökts. Både icke-sorberande och sorberande spårämnena har injicerats i bakgrundssprickan och direkt i zonen medan pumpning skett i zonen. Utvärderingen indikerar att retentionsegenskaperna är signifikant olika för de två flödesvägarna. Specifikt är retentionsegenskaperna (för matrisdiffusion och sorption i olika sprickfyllnads- och sprickmaterial) gynnsammare i flödesvägen i zonen jämfört med flödesvägen som inkluderar bakgrundssprickan. Dock är den sammanlagda retentionen (fördröjningen) större i denna senare flödesväg tack vare det mindre grundvattenflödet i bakgrundssprickan. Utvärderingen visar den stora betydelse små sprickor närmast en potentiellt läckande kapsel kan ha för radionuklidretentionen. Fasen BS2 har rapporterats i en slutrapport /26-142/ samt i underlagsrapporterna /26-143 till 26-146/, se även /26-147, 26-148/.

Inom Äspö Task Force MGFTS har Task 6, som syftar till att överbrygga plats- och säkerhetsanalysmodellering, nyligen avslutats. Utvärderingsrapporter /26-149, 26-150/ har publicerats för de inledande modelleringsövningarna (som handlade om transport i en enskild spricka) samt för uppbyggandet av den semisyntetiska blockskalemodellen (hydrostrukturell modell samt mikrostrukturell modell), som använts för efterföljande modelleringsövningar. I utvärderingsrapporterna framgår referenser till de enskilda modelleringsrapporterna. En utvärderingsrapport för de senare modelleringsövningarna i spricknätverket i blockskalemodellen har slutförts /26-151/, se även /26-152/.

EU-projektet Retrock har slutrapporterats /26-153/. Projektet handlar om hur retentions- och transportprocesser för radionuklidtransport ska behandlas och modelleras i säkerhetsanalyssammanhang. Innehållsmässigt har dock Retrock-projektet rapporterats redan i föregående Fud-program.

Baserat på SKB:s samlade erfarenheter inom spårämnesförsök (med specifikt fokus på True-experimenten i Äspölaboratoriet), Task 6 och Retrock har en rapport sammanställts som diskuterar hur och när information från spårämnesförsök kan användas inom säkerhetsanalytiska applikationer /26-154/. Begränsningen med spårämnesförsök är den korta tidsskalan relativt den tidsskala som är av intresse för säkerhetsanalysen. Sålunda får man vid tester i fält kvantitativ information, som inte nödvändigtvis är av intresse för längre tidsperspektiv, om delar av systemet. Ett exempel på detta är retentionsegenskaper för sprickfyllnadsmaterial. Dessa påverkar starkt och kan helt dominera ett spårämnesförsök, men är av ringa intresse under längre tider då detta material kan mätas.

Emellertid finns det flera andra goda anledningar till att genomföra spårämnesförsök. Här nämns enbart möjligheten att testa konnektivitet i spricknätverk, möjligheten att visa på generell processförståelse och prediktiv förmåga beträffande retentionsprocesser, samt möjligheten att studera hur olika laboriemätta värden skalas upp till fältskala. En generell slutsats är att det sällan är möjligt att direkt använda parametervärden erhållna från spårämnesförsök inom säkerhetsanalysen, men att den förståelse som erhålls i de olika experimentella skalorna kan användas för att härleda effektiva värden för säkerhetsanalytisk användning.

Vid platsundersökningarna har ett flertal spårämnesförsök med metoden Swiw utförts. Dessa har analyserats både med en förenklad utvärderingsmetod /26-155/ och med modellverktyget DarcyTools /26-156/. Utvärderingen visar att retention av sorberande spårämnena skett, men att det är svårt att få fram kvantitativa värden på enskilda parametrar.

Inom radionuklidtransport för säkerhetsanalys har en del mindre uppdateringar av Farf31 gjorts. Dessa uppdateringar gäller inte själva koden utan snarare hanteringen av in- och utdata till programmet. I SR-Can /26-39/ har Farf31 integrerats tydligare med grundvattenflödesmodellen ConnectFlow och närområdesmodellen Comp23. Närområdesmodellen beskriver utflödet från

tre separata källor: en spricka som korsar deponeringshålet, den störda zonen i deponeringstunnelns golv, samt en spricka som korsar deponeringstunneln. ConnectFlow beräknar ingående grundvattenflöden för dessa tre separata källor medan Comp23 levererar nuklidflöden till Farf31 för motsvarande källor. Farf31 beräknar sedan nuklidtransport längs med tre separata flödesbanor för varje kapsel. Dessa flödesvägar har beräknats i ConnectFlow. ConnectFlow beräknar även hur stor andel av varje transportväg som sker i berg, i den störda zonen samt i tunnlar.

En ny metod för att simulera radionuklidtransport håller på att utvecklas. I stället för att använda semianalytiska uttryck som i Farf31 används en partikelmetod, Particles on Random Streamline Segments (Porss). Fördelen med denna metodik är att den kan hantera generell variabilitet i egenskaper längs med och tvärs flödesbanor, transient flöde, samt även sönderfallskedjor (variabilitet i både retentionsegenskaper och hydrodynamiska storheter) /26-157 till 26-160/. I metodiken finns även en uppskalningsalgoritm för transport från diskreta nätverk till kontinuumapplikationer /26-161/. Hur de olika delarna av metoden implementeras i en ny kod beskrivs nedan under program.

Vid radionuklidtransport styr den hydrodynamiska situationen matrisdiffusionen. Detta brukar uttryckas som kvoten av den flödesvätta ytan och flödet. Vid kanalbildning i ett sprickplan orsakad av aperturvariabilitet minskar den flödesvätta ytan och därmed matrisdiffusionen. Vid stark kanalbildning uppstår dock stagnant vatten mellan kanalerna. Radionuklider kan sålunda diffundera in i detta stagnanta vatten från de strömmande kanalerna och sedan från det stagnanta vattnet vidare in i matrisen. En lösning för att hantera denna typ av problem har presenterats i /26-162/. I princip kan den presenterade lösningen inkorporeras i existerande koder för radionuklidtransport. Det viktigaste är dock att kunna visa att matrisdiffusion sker även för fall med kanalbildning i sprickor.

Modellering av advektiv transport i det kopplade grundvatten-ytvattensystemet har gjorts med Mike She och redovisas i /26-23/. Modelleringen visar att detta är ett fungerande angreppssätt för att belysa relevanta frågeställningar kopplade till transporten i övergångszonen mellan geosfär och biosfär.

Program

Inom projektet True-1 Continuation återstår främst att rapportera och producera vetenskapliga artiklar. Visst laboratoriearbete på sorptionsstudierna återstår också, liksom inom True-1 Completion återstår utvärdering och rapportering av spårämnesförsöken. Modelleringen av de Swiw-tester som utförts inom projektet True-1 Completion förväntas även ge kunskap som kan användas för att utvärdera de Swiw-tester som gjorts vid platsundersökningarna. Eftersom Feature A är väl karakteriserad jämfört med de sprickor som används vid platsundersökningarna och flera monitoringsborrhål finns i Feature A, är det principiellt lättare att utvärdera Swiw-testerna i Äspölaboratoriet.

Inom projektet True Block Scale återstår fas BS3, som syftar till en slutlig integrering av hela projektet True BS. Detta ska rapporteras genom vetenskapliga publikationer.

Under kommande period ska Porss-metodiken implementeras i en programkod som kan användas parallellt med Farf31 i säkerhetsanalysen. Koden kallas Marfa (Migration analysis of radionuclides in the far-field). Indata från ConnectFlow används på motsvarande sätt som Farf31 gör i dag, men i stället för att använda integrerade parametrar för transporttid och transportmotstånd (F-faktor) läser Marfa information för varje segment längs med en flödesbana. I ett första skede ska Marfa hantera tidsberoende flöde, medan följande version ska vara fullt transient. Utvecklingen av Marfa sker tillsammans med Posiva i Finland.

Ett första test av Marfa kommer att ske då vissa av resultaten i SR-Can ska räknas om. För detta krävs även viss utveckling av ConnectFlow för att kunna leverera segmentbaserade data. Efter denna första test planeras beräkningar där olika delar av funktionaliteten i ConnectFlow-Marfa testas såsom till exempel olika retardationsmodeller för radionuklidtransport i olika delar av systemet (berg, deformationszoner, tunnlar, ytlager), uppskattning av effektiva retentionsparametrar längs med flödesbanor med olika typer av variabilitet, samt simulering av transport under de transienta flödesförhållanden som en glaciationscykel innebär. Intresset för en internationell modelleringsövning där ConnectFlow-Marfa kunde användas och jämföras med andra modelleringskoncept ska utredas. En övning av detta slag skulle öka trovärdigheten för det nya konceptet och den nya koden.

Även koder för reaktiv transportmodellering utvecklas. Detta beskrivs ovan i 26.2.17. Här kan dock ytterligare nämnas ett planerat projekt i Äspölaboratoriet där den utvecklade metodiken ska användas för att upprätta en platsspecifik transportmodell för sprickor i Äspölaboratoriet. Denna modell kan i syfte jämföras med de modeller som upprättats för övriga ämnesområden i Äspölaboratoriet, till exempel hydrogeologi respektive hydrogeokemiska modeller. Ett separat projekt planeras även där denna typ av modell ska testas för säkerhetsanalytiska applikationer. Då kan frågeställningar som till exempel hur sorptionen påverkas när geokemiska förhållanden förändras studeras.

Transportmodellering med Mike She kommer att fortsätta för att öka förståelsen av transport i de ytnära jordlagren och i övergångszonen mellan geosfär och biosfär.

27 Biosfär

Sedan Fud-program 2004 har flera stora steg tagits i SKB:s biosfärsprogram. De största framstegen har skett inom ramen för arbetet med säkerhetsanalysen SR-Can. En ny metodik har använts för biosfären, där en landskapsdos beräknas. Analyserna av framtidsutvecklingen och dosberäkningarna görs med sammanhängande logiskt och vetenskapligt försvarbar metodik. Platsdata kan utnyttjas i stor utsträckning och hela landskapet analyseras. För arbetet har ett nytt beräkningsverktyg sjösatts, vilket möjliggör komplexa beräkningar snabbare än tidigare verktyg och som samtidigt är användarvänligt.

Kunskaperna om biosfärsprogrammet på platserna har gett en betydligt mer konkret bild av biosfären. Platsundersökningarna har också genererat data till en databas som möjliggör mer realistiska dosmodeller.

För att sprida kunskap om de arbeten som gjorts har publiceringen i vetenskapliga tidskrifter trefaldigats sedan Fud-program 2004, med 30 artiklar publicerade under perioden. Ett temanummer med elva artiklar i tidskriften *Ambio* har varit ett sätt att sprida informationen om SKB:s biosfärsprogram. Dessutom har cirka 80 rapporter publicerats.

Den kommande perioden kommer att karakteriseras av omfattande insatser när det gäller analys av platsspecifika data, samt en säkerhetsanalys. Den långsiktiga biosfärsforskningen är väl anpassad för att kunna bidra med metodik och data för dessa uppgifter, men det finns även en beredskap för att genomföra riktade forskningsinsatser för att lösa nya problem som kan uppträda.

27.1 Tillståndet i biosfären

De ytnära ekosystemen, eller biosfären, är den del av jorden där de flesta organismer, djur, växter och människor lever. I biosfären uppkommer konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från förvaret i form av dos till människa och andra organismer. Beräkningar av omsättningen av radionuklider i biosfären och de doskonsekvenser detta leder till är därför en viktig del av en säkerhetsanalys. De beräknade konsekvenserna används dels för att visa huruvida myndigheternas krav på säkerhet och gränsvärden som uttryckts i doser är uppfyllda, dels som en måttstock för att jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller lokaliseringar. Trovärdiga beräkningar kräver att händelser och processer i biosfären beskrivs på ett realistiskt sätt med motiveringar till varför vissa processer är betydelsefulla och varför andra kan uteslutas. Tillstånden i de ytnära ekosystemen utgör också kemiska (salthalt, syrehalt), hydrologiska (vattenbalans) och geologiska (strandlinjeförskjutning) randvillkor för geosfären.

Det övergripande målet med biosfärsprogrammet är att med en modern vetenskaplig kunskapsbas beskriva de från radiologisk synpunkt viktigaste processerna i biosfären, samt att ge ett tillräckligt vetenskapligt stöd för att bedöma miljökonsekvenserna av att bygga och driva ett förvar.

I SR-Can har metodiken för biosfärsberäkningarna tagit ett stort steg framåt genom att platsdata för första gången används i större utsträckning. Ett helt nytt sätt att beräkna dos till människa och av den påverkade populationen har redovisats, liksom en ny typ av doskonverteringsfaktorer (LDF) som baseras på befintlig kunskap om platserna.

Vid granskningen av Fud-program 2004 såg myndigheterna positivt på att SKB under senare år ökat ambitionerna inom biosfärsområdet. SSI välkomnar att SKB:s forskning inom biosfärsområdet under senare år har genomförts mera metodiskt och med högre ambition än vad som tidigare varit fallet, men framhåller att Fud-program 2004 inte ger en bra beskrivning av den biosfärsforskning som genomförs. Kasam anser att Fud-program 2004 är tydligare än tidigare program vad avser fortsatta undersökningar av biosfären och stödjer programmets mål att med modern kunskapsbas beskriva de radiologiskt viktigaste processerna i biosfären samt att ge stöd för MKB. Kasam anser också att biosfärsmodellerna bör tillämpas på både radionuklider och andra ämnen som kan påverka miljön. I de följande avsnitten försöker vi ytterligare tydliggöra erhållna resultat och våra mål. Vi hoppas också att vi kan inspirera andra aktörer att utnyttja våra metoder för att studera andra ämnen än radionuklider i miljön.

27.2 Förståelse och konceptuella modeller

Myndigheternas föreskrifter kräver av kommande säkerhetsanalyser dels en mer realistisk beskrivning av biosfären, dels en uppskattning av konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp för omgivande fauna och flora /27-1, 27-2/. Platsundersökningarna gör biosfären konkret, vilket innebär att förenklingar av hur man betraktar biosfären måste återspegla den aktuella platsen.

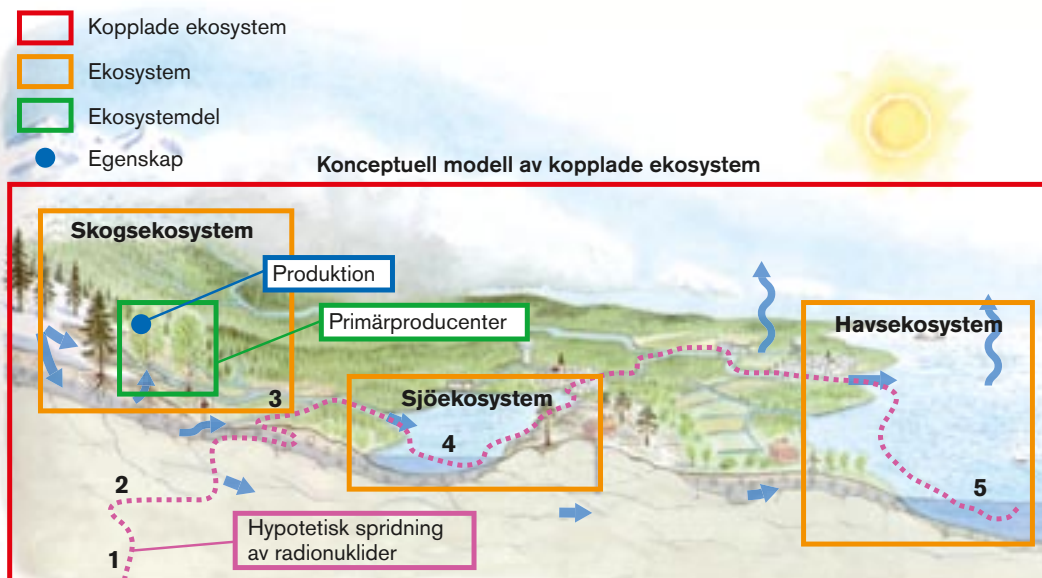
Utvecklingen av processbaserade modeller bedöms vara en framkomlig väg att demonstrera förståelse, samtidigt som dessa modeller ger numeriska resultat som kan användas i säkerhetsanalysen. Angreppssättet är systemekologiskt, där hänsyn tas till både biologiska och abiotiska processer i ekosystemen. Kunskapen om processerna finns inom många områden, till exempel i konceptuella och numeriska modeller för skogsbruket, inom studier av omsättningen av näringsämnen i sjöar och hav eller av omsättningen av miljögifter. Däremot har denna information sällan använts för studier av hur radionuklider omsätts. Det krävs också generaliseringar för de långa tidsperspektiv och varierande miljöer som kommer ifråga vid en säkerhetsanalys för ett slutförvar.

Processtudier vid undersökningsområdena utgör ett värdefullt komplement till modeller, både för att erhålla och demonstrera förståelse och för att generera resultat som kan användas i säkerhetsanalysen.

För att skapa en trovärdig beskrivning av biosfärens utveckling över tiden, och av effekterna av ett eventuellt läckage av radionuklider från ett framtida förvar, behöver de konceptuella modeller som används stå i samklang med den vetenskapliga uppfattningen inom radioekologi, men också inom ekologi, ekotoxikologi, hydrologi och miljövård. Figur 27-1 visar en konceptuell modell av kopplade ekosystem.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Fud-program 2004 konstaterade att det långsiktiga stödet för kompetensuppbyggnad fortsätter och att dokumentationen till biosfärsmatrisen kompletteras. Sammanställningen av viktiga processer kommer att fortsätta, speciellt det internationella samarbetet. I övrigt angavs att nyvunna kunskaper från flera delprogram kommer att fångas upp, till exempel när det gäller modellutveckling och transportprocesser liksom när det gäller att kvantifiera viktiga processer i skogsekosystem, myrmark och sediment.



Figur 27-1. Konceptuell modell av en plats, där berggrund, regolit, jordtäckte, biota och hydrologi illustreras. Den röda prickade linjen illustrerar den hypotetiska transportvägen för en radionuklid. (1) Nukliden tas in i den hydrologiska flödesmodellen. (2) Vattenflödet i den övre uppspruckna delen av berggrunden och i gränsen berg/jord modelleras. (3) En hydrologisk modell beskriver den yttliga flödesvägen. (4 och 5) Utsläppet till ekosystemen kan exempelvis ske via våtmarker, vattendrag, sjöar eller jordbruksmark till slutdestinationen havet.

Vid granskningen av Fud-program 2004 ansåg SKI och SSI att det måste finnas en fullständig dokumentation av de processer som ingår i de använda modellerna. Vidare ansåg SSI att det behövs en komplett beskrivning av samtliga modeller som ska användas i säkerhetsanalysen, med en redogörelse för hur väl de representerar relevanta ekosystem.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Vid analysen av platsundersökningarna har platsspecifik information bearbetats /27-3 till 27-5/ och gjort det möjligt att konkretisera landskapets förändring /27-6, 27-7/, vilket har varit väsentligt för att kunna beräkna landskapsdosfaktorer i SR-Can /27-8/. Det systemekologiska synsättet /27-9/ har varit värdefullt för att kunna systematisera kunskaperna och för att använda jämförbara mått på massflöden, där vatten och organiskt kol representerar mätvariablerna för flödena /27-3, 27-5/. Normaliseringen till organiskt kol har förenklat beskrivningen av massflöden, men också gjort det möjligt att beräkna den mest utsatta gruppen vid ett eventuellt läckage från förvaret /27-8/. Människors födointag kan omräknas till organiskt kol. Då den totala mängden organiskt kol inom ett område begränsas av växternas produktion kan man beräkna den bärkraftiga födotillgången för framtida människor på de undersökta platserna /27-10/. Eftersom överföringsfaktorer har räknats om till mått baserade på organiskt kol i stället för att, som brukligt är, anges per enhet våtvikt, har variationerna för överföringsfaktorerna minskat avsevärt /27-11/.

Med de nya landskapsmodellerna /27-6 till 27-8/ har vi skaffat oss en grundlig förståelse för egenskaperna vid platserna i tid och rum.

För att effektivt kommunicera ny vunnen kunskap och förståelse mellan utförare av platsundersökningar, platsanalys till forskning och säkerhetsanalys har nätverket SurfaceNet för ytnära ekosystem skapats. I denna grupp ingår representanter för ämnesområden som exempelvis hydrologi, geohydrologi, kemi, terrester och marin ekologi, limnologi, kvartärgeologi, kulturgeografi och säkerhetsanalys. Diskussionerna i gruppen SurfaceNet har bidragit till nya vetenskapliga insikter när det gäller modellering av landskap och ekosystem, samt för ekosystemens dynamik. Speciellt har interaktionerna med utförare från universitet och högskolor varit viktiga i SurfaceNets arbete för att kunna genomföra ett program med god kvalitet. Förutom de arbeten som redovisas nedan har publiceringen av ett temanummer av *Ambio* (volym 35, nummer 8, 2006) varit ett viktigt led i att öka förståelsen, se avsnitt 27.8.

Samarbetet med universitet och högskolor för den långsiktiga kompetensutvecklingen har fortsatt. SKB har under perioden stöttat två doktorsavhandlingar, en i limnologi vid Uppsala universitet /27-12/, se avsnitt 27.6, en i kvartärgeologi vid Stockholms universitet /27-13/, se avsnitt 27.7. Dessutom har SKB stöttat och delvis handlett ett examensarbete vid Uppsala universitet om en radionuklidprofil i en myr /27-14/, vilket resulterat i ett doktorandprojekt vid Umeå universitet, se avsnitt 27.4. Vid Lunds universitet har ett examensarbete om marken i skogen stöttats /27-15/ och vid Stockholms universitet har ett arbete om elementsammansättningen i marina organismer genomförts med stöd från SKB /27-16/.

För närvarande stöder SKB en doktorand i oceanografi vid Stockholms universitet när det gäller att beräkna partikeltransport i havet, se vidare avsnitt 27.6, och en doktorand i hydrologi vid Stockholms universitet /27-17/. I samarbete med Bioprota stöder SKB en doktorand vid Université Henri Poincaré i Nancy när det gäller rörelser av jod i en mosse i Kanada. Bioprota är ett internationellt projekt om biosfärsaspekter av bedömningen av slutförvarets långsiktiga säkerhet.

Program

SKB kommer att fortsätta samarbetet med universitet och högskolor för att hålla en dialog vid forskningsfronten vid liv och för att trygga den långsiktiga kompetensutvecklingen. Det systemekologiska angreppssättet kommer även i fortsättningen att vara en viktig metodik för att få en sammanhängande helhetsbild av biosfären i tid och rum. Mycket av förståelsen av platserna kommer att utvecklas i respektive program nedan och kommer att rapporteras inför SR-Site. I arbetet för respektive delekosystem kommer de viktigaste processerna och interaktionerna att dokumenteras.

27.3 Modellutveckling

De senaste åren har en omfattande modernisering av SKB:s verktyg för dosberäkningar i biosfären genomförts med utvecklingen av Pandora (Tensit) som baseras på Simulink och Matlab /27-18, 27-19/. SR-Can var den första säkerhetsanalysen där verktyget tillämpades.

SKB:s modelleringar av radionuklidspredning i biosfären i tidigare säkerhetsanalyser har genomförts med verktygen Biopath och Prism. Dessa har utvecklats av Studsvik med stöd från SKB sedan 1970-talet. Verktygen har utnyttjats för de tidiga KBS-studierna av slutförvaret, för de första säkerhetsanalyserna av SFR, senare för SKB 91, SR 97 och Safe. Biopath och Prism har successivt vidareutvecklats /27-20 till 27-22/. Modellerna representerar ett holistiskt synsätt, vilket på 1970-talet var banbrytande inom miljöområdet. Vid den tiden betraktades de också som avancerade numeriska redskap. Modellkonceptet har i stort sett övertagits i de flesta modeller som hanterar radionuklidspredning i biosfären i andra länder. Konceptet baseras till stora delar på användandet av generiska överföringsfaktorer (eller transfer- och bioackumulationsfaktorer), vilka förutsätter att systemet som modelleras befinner sig i jämvikt. Dessutom baseras överföringsfaktorerna i många fall på empiriska data och saknar en mekanistisk förklaringsgrund. Modellerna beskriver de vägar som berör människan och hennes föda medan andra delar av biosfären sällan berörs.

Med det nyutvecklade verktyget Pandora kan processbaserade modeller användas, vilket i Fud-program 2004 ansågs vara nödvändigt för att kunna ta tillvara platsspecifik information om processer och tillstånd i ekosystemen. Dessutom behövs en mer realistisk beskrivning av biosfären för att möta de krav som ställs av myndigheterna på en analys av vilka konsekvenser ett eventuellt framtida utsläpp av radionuklider från ett slutförvar kan leda till. För att uppskatta konsekvenserna för omgivande fauna och flora enligt föreskrifterna krävs modeller som baseras på radionuklidflödet i hela ekosystemet och inte enbart för specifika vägar som är kritiska för människan, till exempel brunn eller komjölk.

Användningen av processbaserade modeller löser en del av dessa problem. Överföringen mellan reservoarer blir, förutom via vattenflödena, baserad på naturliga processer som till exempel fotosyntes, nedbrytning, födointag, metabolism och näringsbehov. Dessa processer är kopplade. Flödena drivs huvudsakligen av massbalansen mellan fixeringen och nedbrytningen av organiskt material. Massbalansen inducerar andra flöden av organiska och oorganiska material (till exempel syre, koldioxid, vatten och näringsämnen). Till dessa flöden associeras proportionella flöden av radioaktiva ämnen. Modellerna är generella och kan användas för alla radionuklider. Även om data saknas för överföringsfaktorer kan goda uppskattningar göras av koncentrationen i olika reservoarer och organismer. En annan fördel är att modellerna är skalbara till olika plats- och klimatförhållanden. Flera av variablerna som styr radionuklidupptaget är mätbara i fält och icke nuklidspecifika, till exempel avrinningsområdets geometri, solinstrålning, vattenbalans och ekosystemets sammansättning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Målet i Fud-program 2004 var att inför SR-Can kunna ha en fullt fungerade simuleringsmiljö med Tensit. Det målet uppfylldes i och med att Tensit, som sedan döptes om till Pandora, användes i SR-Can, se nedan.

Vid granskningen av Fud-program 2004 ansåg SKI att utvecklingen av modeller inom biosfärsområdet måste prioriteras och platsdata integreras i detta arbete för att verifiera modellerna i tid före tillståndsansökan. SSI ansåg att utvecklingen av en systemekologisk modell är ett bra komplement till de kompartmentmodeller som använts hittills.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

För beräkningen av LDF (landskapsdosfaktorerna) i SR-Can /27-8/ användes verktyget Pandora /27-19/. Under SR-Can gjordes en del revideringar av verktygen för att kunna optimera beräkningstider och hantera landskapsutvecklingen effektivare. Dessutom anpassades Pandora och det probabilistiska verktyget Eikos för att enkelt kunna göra probabilistiska beräkningar /27-23/. Pandora utvecklades tillsammans med Posiva och är i dagsläget en mycket flexibel modellplattform.

I samband med SR-Can implementerades också versionshantering och automatisk dokumentation med versionshanteringsverktyget Subversion /27-24/, med spårbarhet för att kunna hantera den mängd av modeller och indata som regelbundet uppdateras /27-6, 27-7/.

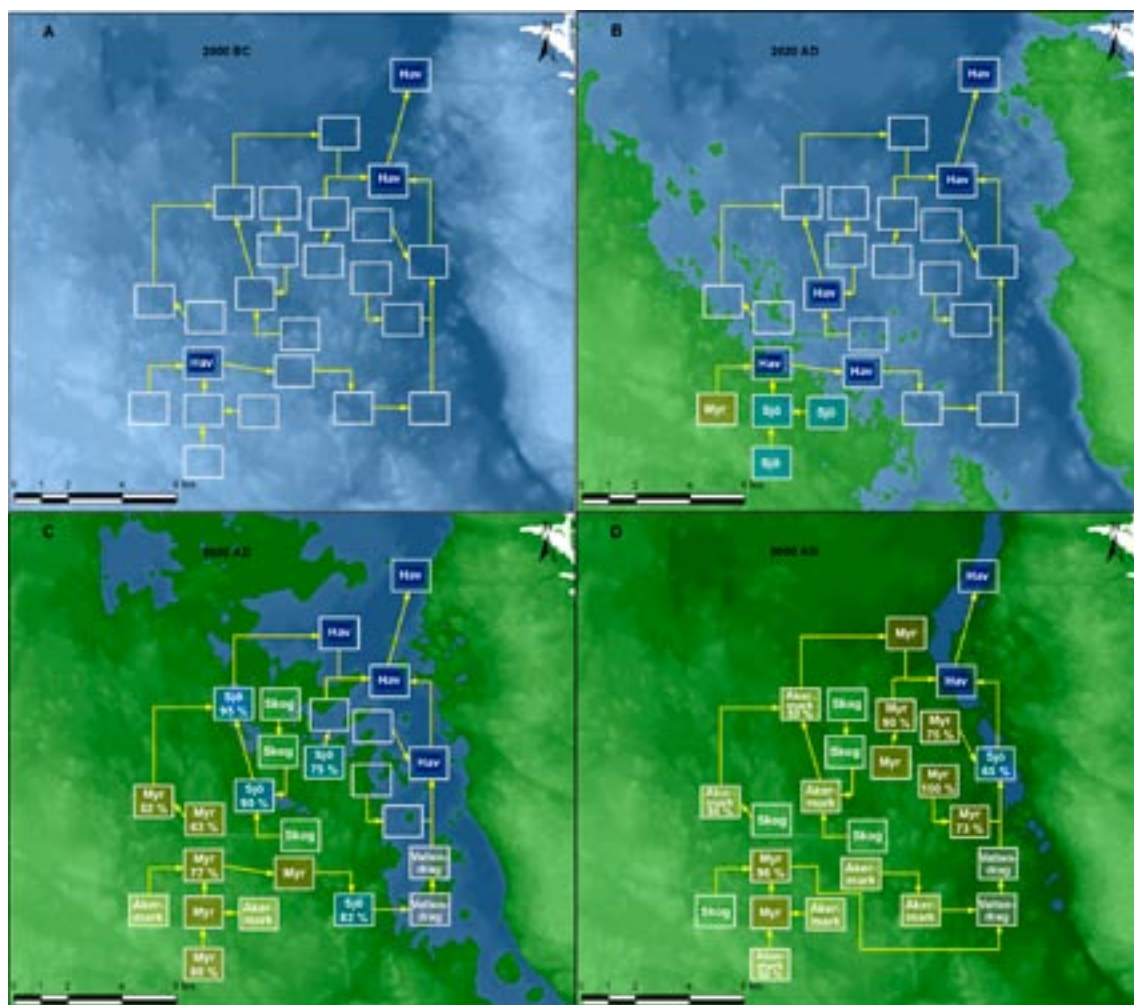
Ett annat verktyg som utvärderats är Ecopath. Det är ett generellt ekologisk modellpaket. Analyserna visar att Ecopath kan förenkla eller ersätta mera komplexa modeller i akvatiska ekosystem /27-25/, vilket gör den intressant för generella tillämpningar där platsdata saknas. Därför är detta verktyg mer intressant för andra organisationer som inte har tillgång till platsdata i samma utsträckning som SKB. Resultaten av utvärderingen har publicerats i en vetenskaplig artikel /27-26/.

För att bygga upp landskapsmodellen och sammanställa data från ekosystemen har Gis använts i stor utsträckning /27-6, 27-7/, se figur 27-2. Gis har också använts för att beräkna avrinning direkt baserad på topografi och för att sammanställa indata för de processbaserade Mike She-modellerna, se avsnitt 27.4.

För säkerhetsanalysen har en skogsmodell tagits fram /27-27/, se vidare avsnitt 27.5.

Program

Pandora kommer att användas för att bygga processbaserade modeller för respektive dekosystem. Under arbetets gång kommer relevanta uppdateringar av verktyget att göras. Även modifikationer av versionshantering och rapportgenerering kommer att ses över, liksom rutiner för verifiering. Dekosystemen som behövs beskrivs i följande avsnitt.



Figur 27-2. Landskapsmodellen i Forsmark. Rektanglar motsvarar olika ekosystem som sammanbinds av ythydrologin som indikeras med pilarna. Kartorna visar tillståndet vid olika tidpunkter A) havsperioden 8000 f Kr till 1000 e Kr; B) kustperioden (i dag), C) terrestra perioden (5000 e Kr) samt D) efter 7000 e Kr /27-6/.

27.4 Transportprocesser

Transportprocesserna avgör vilka ekosystem och organismer som kommer att utsättas för radionuklider samt hur stor utspädningen blir. I säkerhetsanalysen utgör transportprocesserna en väsentlig del av beräkningarna. Den viktigaste av de variabler som är relaterade till transportprocesser är vattenomsättningen. Den spelar en betydelsefull roll i samtliga biosfärsobjekt och beror huvudsakligen på ytvattensystemets komponenter (avrinning, vattendrag, sjöar och hav). Ytvattenrörelserna påverkar också hur olika biosfärsobjekt kopplas samman, se till exempel figur 27-2.

För radionuklidtransporten är den vertikala transporten mellan övergången i berget till recipient väsentlig. Den påverkar var eventuella utsläpp kan ske, och därmed vilka ekosystem som kan påverkas. Studier i denna övergångszon sker med verktyg som beskriver både de djupa och de ytliga grundvattenflödena. Arbetet beskrivs därför både i detta stycke och i avsnitt 26.2.3 för geosfären. Andra potentiellt viktiga transportprocesser är de som sker från grundvattenytan till växter och avlagringar i den omättade zonen.

En andel av radionukliderna i miljön kommer att vara bundna till partiklar, humuskomplex och organismer. Därför är transporten av radionuklider i biosfären i större utsträckning beroende av partikeltransport. Partikeltransporten kan vara passiv som vid sedimentation och resuspension eller aktiv som vid transport via simmande organismer, födoing, handel med mera.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Fud-program 2004 föreslog fördjupade studier i ythydrologi, med en utvärdering av ythydrologiska modeller och förenklade Gis-verktyg, och dessutom modellstudier av ämnestransport vid utströmningspunkter från berget, speciellt hur ämnen rör sig i närheten av sjö- och havsbäcken. Fud-program 2004 föreslog också modell- och litteraturstudier av partikeltransport kompletterade med fältdata från platsundersökningarna. Dessutom föreslogs en modell- och litteraturstudie av människans transporter under olika förhållanden för att avgränsa hur många människor som kan komma att beröras av ett kontaminerat område. En sådan studie skulle underlätta ett ställningstagande om representativiteten av den mest utsatta gruppen enligt SSI:s föreskrifter. Resultaten av de föreslagna studierna redovisas nedan.

Vid granskningen av Fud-program 2004 skrev SSI att forskning kring övergången mellan geosfär och biosfär är viktig och man såg positivt på att SKB börjat utreda transportprocesser i övergången mellan geosfär och biosfär samt hur detta ska tas in i kommande säkerhetsanalyser. SSI saknade dock en tydlig plan för hur SKB tänker bedriva forskningen om denna övergång. Vidare ansåg SSI att resultaten från modelleringen av ytvattenhydrologi bör tolkas med försiktighet eftersom antagandena är alltför förenklade. Dessutom borde SKB, enligt SSI, försäkra sig om att nödvändiga data för detta samlas in vid platsundersökningarna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

I landskapsmodellerna i SR-Can används hela landskapets hydrologi i större utsträckning än i tidigare säkerhetsanalyser. Olika biosfärsobjekt som är belägna längs vattnets väg i avrinningsområdena kopplas samman, vilket möjliggör att radionuklider från flera utsläppspunkter kan adderas i till exempel sjöar nedströms. Därigenom kan en eventuell ackumulation av radionuklider i områden nedströms utströmningspunkterna upptäckas /27-8/. De preliminära känslighetsanalyserna av landskapsdosfaktorer (LDF) /27-8/ visar att topografin har stor betydelse. Det beror på att topografin styr delavrinningsområdenas storlek, det vill säga den totala avrinningen, samt även de olika objektens volymer eller areor, vilket i sin tur påverkar vattenomsättningen i de olika objekten. Det är positivt från modelleringssynpunkt att doserna påverkas av relativt lätt förutsägbara egenskaper som topografi. Dessutom ger landskapsmodellerna helt nya möjligheter att koppla samman utströmningspunkter med objektens egenskaper och att tillvarata och utnyttja platsspecifika egenskaper.

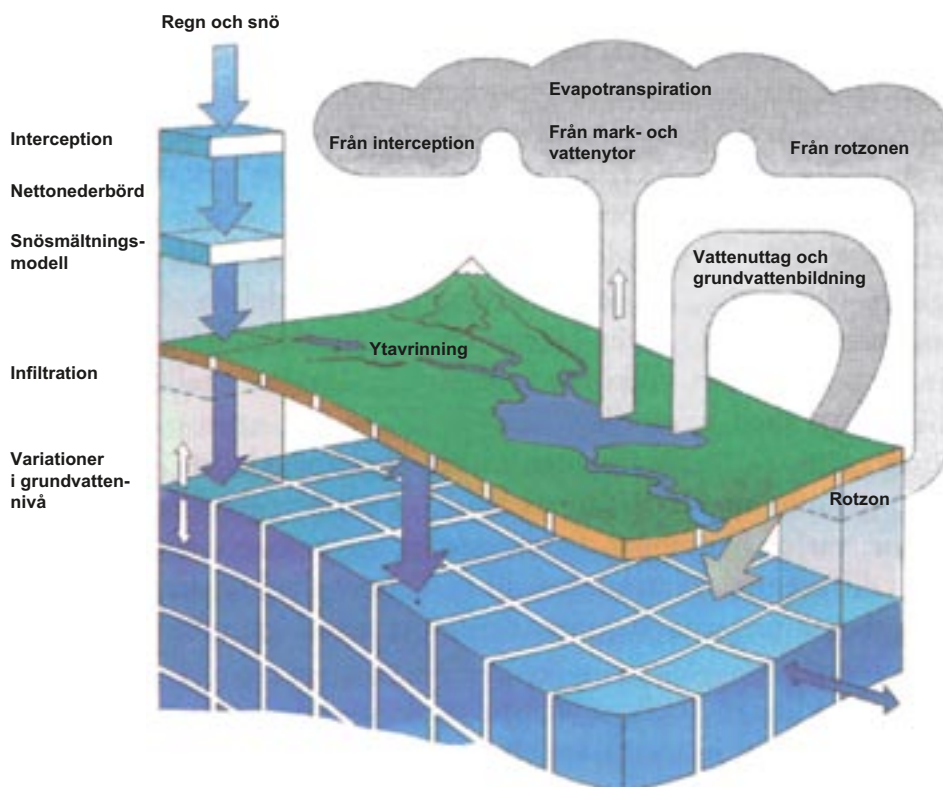
Ythydrologin har beskrivits med enkla Gis-modeller som beräknar delavrinningsområdets area uppströms utströmningspunkten och multiplicerar arean med den specifika avrinningen /27-6, 27-7/. Topografiskt våtindex (TWI) är ett exempel på en annan förenklad modell som använts och andra Gis-baserade metoder som kan ge vägledning var utströmning kan ske, var våtmarker finns och var

bäckar uppstår /27-28/. Dessa ”förenklade” modeller har jämförts med olika typer av mer avancerade hydrologiska modeller i Gis /27-17, 27-29/ eller i speciella verktyg som Mike She /27-30/ och Shetran /27-31/. Identifiering av in- och utströmningsområden för grundvatten är en viktig del av den hydrologiska modelleringen. In- och utströmningsområden för ytnära grundvatten i Forsmark har identifierats med såväl topografiska som hydrologiska och kemiska metoder. En sammanställning och jämförelse av resultaten presenteras i /27-32/.

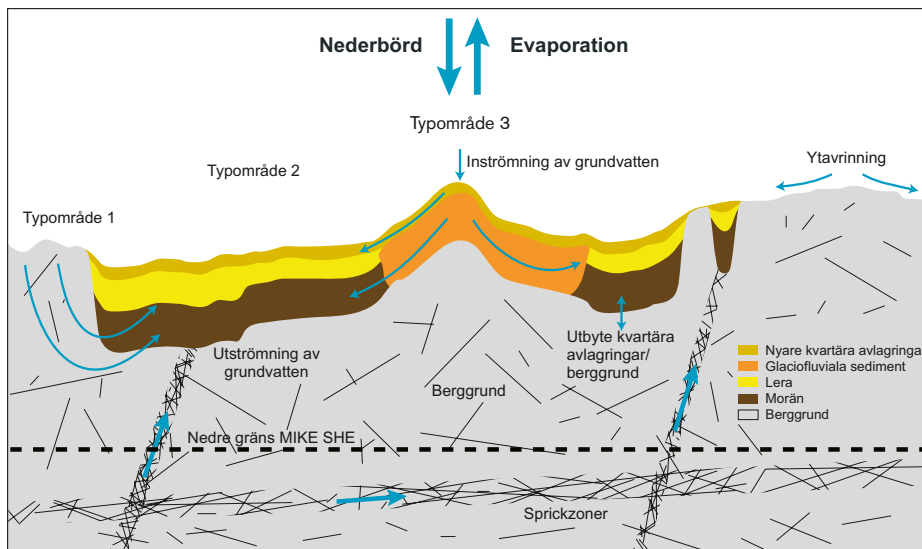
Mike She-verktyget är processbaserat och simulerar hela den hydrologiska cykeln inom det studerade området. Detta innebär att modelleringen inkluderar både grundvattenströmning och omätnad strömning ovanför grundvattenytan, samt ytvattenflöden på markytan och i vattendrag, se figur 27-3. Detta gör verktyget lämpligt för att studera interaktioner med djupare grundvatten, se avsnitt 26.2.3, men också för att jämföra förenklade modellers egenskaper. De ”förenklade” Gis-modellerna används i säkerhetsanalysen för att kunna bedöma framtida ythydrologi och beräkna vattenomsättningen i framtida ekosystem.

Mike She-verktyget har använts för att beskriva den ytnära hydrologin som den ser ut i dag vid platserna /27-33 till 27-35/, se figur 27-4. Dessa modelleringar har även presenterats i vetenskapliga tidskrifter /27-36/. Dessutom har jämförande flödesmodellering av Laxemarområdet genomförts med modelleringsverktyget Ecoflow /27-37/. Resultaten visade på mycket god överensstämmelse med resultaten från beräkningarna med Mike She för flertalet av de undersökta avrinningsområdena. Mike She har också använts för att beräkna effekterna på den ytnära hydrologin av ett öppet förvar, inklusive av tillfartstunneln och av hiss- och luftschakt /27-38, 27-39/. Platsundersökningarna har genomfört omfattande undersökningar av den ytnära hydrologin och havsströmmarna och resultaten från undersökningarna genomgår just nu en grundlig analys.

Mike She har också använts för att studera vattenflödena och ackumulationen av ämnen vid en myrutveckling /27-40/. Tre områden studerades: Bolundsfjärden, Eckarfjärden och Puttan. Dessa är beskrivna och modellerade med avseende på jorddjup och hydrogeologiska egenskaper, se vidare Geoeditorn avsnitt 27.10. Analyserna av de framtida myrarna visar att de hydrauliska förhållanden som råder i dag kommer att förändras i samband med att ett torvlager utvecklas. Olika typer av vegetation kommer att utvecklas till olika typer av torv, vilket påverkar transporten.



Figur 27-3. Översikt av modellstrukturen och de ingående processerna i verktyget Mike She /27-30/.



Figur 27-4. Schematiskt tvärsnitt av ytnära hydrologi i Simpevarpsområdet, som visar att Mike She används en bit ned i berget och därmed överlappar den geohydrologiska modellen. Typområde 1, 2 och 3 identifierar de hydrologiska typområdena /27-35/.

Den vertikala transporten följer in- och utströmningsområdena med de högsta koncentrationerna nära källan. Lägre koncentrationer erhålls i utströmningsområdena och under lersediment /27-40/. Detta jämfördes också med ett alternativt verktyg /27-41/. Ett resultat från dessa studier är insikten att vid igenväxningen av en sjö krävs att en huvudfåra hålls öppen för dräneringen från större dräneringsområden, det vill säga det krävs ett vattendrag genom den framtida myren.

Generiska modelleringsstudier av radionuklidtransport i rinnande vatten och dess sediment har genomförts /27-42, 27-43/, se även avsnitt 27.6, vilka visar att retentionen i sediment ibland kan ha betydelse.

Couppmodellen, se avsnitt 27.5, har använts för att studera transportprocesser. Främst har modellen använts för att beräkna evapotranspirationen i vegetationsklädda ekosystem /27-44/ och för att beräkna radionuklidflödet från grundvattenytan /27-45/. Utvecklingen av radionuklidmodellen för skog fokuserar också på dessa variabler, men simulerar också vidaretransporten av radionuklider i jord, växter, svampar och däggdjur /27-27/.

I ett examensarbete vid Uppsala universitet /27-14/ beskrevs några viktiga radionuklider som analyserades med gammaspektrometri i en jordprofil från en myr i Oskarshamn. Studien visade att radionuklider har omfördelats efter fastläggningen i profilen. Studien av myrprofilen kompletterades med ytterligare analyser av stabila ämnen /27-46/. En möjlig liknande studie har startats i Krycklanområdet i Vindelälvens avrinningsområde för att göra jämförelser med Forsmark och Oskarshamn.

I platsbeskrivningarna för ytekosystemen /27-3 till 27-5/ gjordes nya insatser när det gäller övergripande materialtransport i de ytnära ekosystemen. Insatserna baserades på tidigare workshops /27-47/. Omsättningen av framför allt organiskt kol i landskapet studerades och jämfördes med vattenomsättningen. Flera av dessa studier har publicerats i vetenskapliga tidskrifter /27-36, 27-48 till 27-53/.

Inledande modelleringar av transporten av lösta ämnen från berg till jordlager och vidare inom ytsystemet har redovisats /27-33, 27-36, 27-39/. Dessa modelleringar utgörs i första hand av partikel-spårningssimuleringar som gjorts med Mike She. Resultaten indikerar i huvudsak vertikal strömning och transport i jordlagren, och relativt små skillnader i utströmningspunkternas lägen jämfört med de mer storskaliga modeller som inkluderar det djupa berget. Mer systematiska modelleringar, på basis av uppdaterade platsmodeller, behöver dock göras innan effekterna av transporten i det ytnära systemet kan bedömas.

Transporten i ytsystemet, såväl flödesvägarnas lägen som retentionen längs flödesvägarna, undersöks för närvarande. Dessa modelleringsaktiviteter syftar till att vidareutveckla existerande konceptuella modeller och därmed skapa ett underlag för detaljerad planering av fortsatta modelleringar inom platsbeskrivningar och säkerhetsanalys. Det ska också noteras att platsundersökningarna under de senaste två åren har omfattat undersökningar fokuserade på tänkbara utströmningsområden för radionuklider från djupet, se till exempel /27-54/. Dessa undersökningar kommer att utgöra en viktig del av underlaget för den plats specifika transportmodelleringen framöver.

Program

Under det närmaste året kommer resultaten från platsundersökningarna att analyseras. Vi förväntar oss nya plats specifika insikter om den ytnära hydrologin, som kan kräva vidare undersökningar av fenomen som upptäcks.

De ythydrologiska modellerna kommer att utvecklas och uppdateras allt eftersom nya data blir tillgängliga. En insats planeras för att studera framtida förhållanden vid platserna med Mike She eller motsvarande, för att därigenom ge svar inför SR-Site om hur ythydrologin kommer att förändras med landhöjningen.

Partikeltransporten i havet kommer att modelleras, dels som trajektorieberäkningar, dels genom modellering av resuspension av sediment på grunda bottenar, med sikte att ge ett tillräckligt underlag inför SR-Site.

En studie av radionuklidtransporten i Krycklanområdet i Vindelälvens avrinningsområde och på SKB:s undersökta platser kommer att fortsätta som ett doktorandprojekt. Viktiga delresultat kommer att publiceras före SR-Site.

En sammanfattande rapport som hanterar konceptuella modeller och transportegenskaper i övergången mellan geosfär och biosfär för Forsmarks- och Laxemarområdet, planeras som en del av platsbeskrivningen.

Planering av aktiviteter som syftar till att öka kunskapen om de plats specifika förutsättningarna för sorption pågår. Dessa aktiviteter kommer sannolikt att utgöras av både utvärderingar av koncentrationsdata från platserna och laboratorieundersökningar av sorptionsegenskaper.

27.5 Terrestra ekosystem

De terrestra ekosystemen, det vill säga skog, jordbruksmark och myr, kännetecknas av att de normalt har en grundvattenyta som ligger under markytan. De dominerande transportprocesserna från grundvatten upp till dessa system är rotupptag, kapillärkraft och grundvattenytans nivåfluktuationer. Rotupptaget och ackumulation i biomassa är dock de viktigaste processerna för att transportera radionuklider till människor och andra konsumenter. Myren och andra våtmarker är de sällfall där grundvattenytan under en stor del av året fluktuerar runt markytans nivå, men för övrigt har dessa områden likartade egenskaper som marker där grundvattenytan alltid ligger under marknivå. I detta avsnitt behandlas först generella markprocesser. Därefter tas skogen och våtmarker upp som specialfall.

Skogen är det dominerande ekosystemet vid de tilltänkta lokaliseringarna och kan vara en tänkbar recipient, se figur 27-5. Resultat från studier av utströmning av grundvatten, se avsnitt 27.4, visar dock att få strömlinjer hamnar i skogen. De flesta av dessa mynnar i vattendrag, i strandkanten av sjöar och hav, samt i våtmarker. SKB har under de senaste åren studerat de terrestra miljöerna (se nedan) och även simulerat upptaget av olika ämnen i vegetation /27-27, 27-45/. De viktigaste långsiktiga processerna är ackumulation av nuklider i jordprofilen och biologiska urlagningsprocesser som förflyttar nuklider till biota. Upptag av radionuklider från grundvattenytan in i rötterna och växtligheten är också väsentlig. Processerna i skogsekosystemen är nära kopplade till den ytnära hydrologin och våtmarkernas utveckling. Det är framför allt skogar i sänkor, till exempel sumpskogar, som kommer att vara intressanta med avseende på effekter från ett slutförvar – inte skogar i höjdlägen, till exempel hållmarkstallskogar.



Figur 27-5. Skogen i Laxemarområdet med vy ut mot havet.

Myrar och våtmarker är viktiga recipienter vid de tilltänkta lokaliseringarna. Redan i SR 97 identifierades myren som det typekosystem som ger den potentiellt högsta dosen till människan, för många radionuklider högre doser än de som kan fås från brunnar. Detta bekräftades i SR-Can, men där visades också att avkastningen av föda från myrar är begränsad. I de flesta fall räcker inte maten från en viss myr till en årskonsumtion för en människa. Dessutom krävs flera steg av förändringar av myrar för att de ska ge en exponering till människor, till exempel utdikning, uppodling eller eldning av torv. I SR-Can konstaterades att myrar är vanliga i många områden, de är en trolig utströmningspunkt från geosfären och ett troligt resultat av den naturliga framtida utvecklingen av biosfären efter landhöjningen i ett kustområde. Dessutom har det varit vanligt att dika ut våtmarker för att erhålla jordbruksmark i delar av norra Uppland /27-55/ och i Simpevarpsområdet /27-7/.

Därför är det viktigt att fördjupa kunskaperna om myrar och våtmarker, samt att studera viktiga processer som kan påverka radionuklidtransporter och potentiella exponeringsvägar i anslutning till dessa områden.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 planerades fortsatta studier av fördelning av biomassa, primärproduktion och kolets kretslopp i olika skogstyper, bland annat i sumpskogar. Dessutom planerades studier av historiskt och potentiellt utnyttjande av olika markslag på de aktuella platserna samt vidareutveckling av våtmarksmodeller, bland annat med hjälp av studier om myrars hydrologi. Resultaten redovisas nedan.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2004

Under de senaste åren har en omfattande kunskap erhållits om de terrestra ekosystemen, bland annat genom platsundersökningarna och platsbeskrivningarna (se nedan). I SR-Can tillämpades för första gången att olika ekosystem kopplades ihop i ett landskap /27-6 till 27-8/.

Utvecklingen av en generell vegetationsmodell, med skogen som exempel för dosberäkningarna /27-27/ har genomförts och tillämpats i SR-Can /27-8/. Tidigare har få modeller för långtidssimuleringar av radionuklidtransporter i skog varit tillgängliga, men med hjälp av verktyget Pandora, se avsnitt 27.3, går det att, förutom att beräkna nuklidtransport, även uppskatta koncentrationen av radionuklider i jord, växter, svampar och däggdjur.

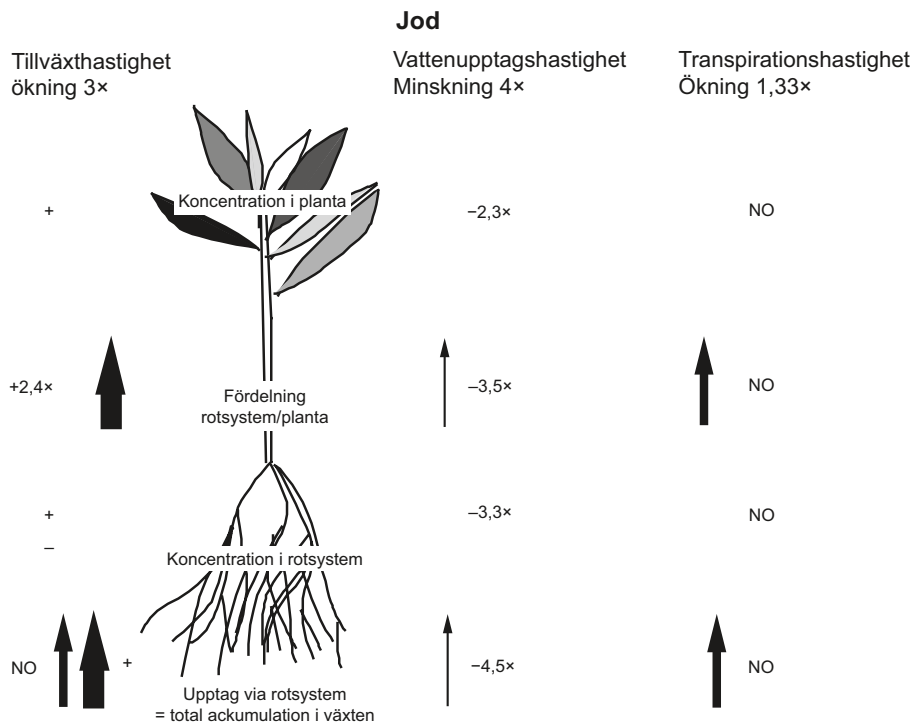
Parallellt har arbetet med Coupmodellen fortsatt. Coupmodellen är en modell utvecklad av Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) och Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) och kan bland annat hantera transpiration, näringsupptag och tillväxt /27-56/. Den har fördelen att den är processbaserad och använder massflöde, transpiration och primärproduktion, samt att den är kopplad till en omfattande databas insamlad av SLU. Modellen har modifierats för SKB:s behov och kan nu också hantera transport av radionuklider i olika ekosystem, exempelvis skog, jordbruksmark och våtmark /27-45, 27-56/. Coupmodellen har också tillämpats för att beräkna produktion och evapotranspiration för några typiska ekosystem vid platserna /27-44, 27-57/, vilket också publicerats i *Ambio* /27-51/. Fortsatt arbete pågår med att anpassa Coupmodellen för radionuklidtransport med olika fallstudier och känslighetsanalyser.

I de platsbeskrivande modellerna har flera materialflödesmodeller tagits fram /27-3 till 27-5/. De sammanställer också de viktigaste reservoarerna av organiskt material i marken och jämför dem med reservoarer i havs- och sjösediment. Detta ger vägledning till var radionuklider som en gång har bundits till organismer kan ackumuleras. Resultaten har publicerats i vetenskapliga artiklar /27-50, 27-53/.

För att kunna beräkna omsättningen av material är kunskapen om vegetationen väsentlig. Det gäller till exempel mängden av den levande biomassen, men också hastigheten på processer som fotosyntes som bygger upp organiskt material (primärproduktionen), och nedbrytningen av organiskt material, vilket ger mineralämnen (respirationen) respektive nytt organiskt material. De flesta produktionsmodeller och globala modeller för klimat, hydrologi och biokemi behöver vegetationsdata för att fotosyntes, evapotranspiration och nettoprimärproduktion ska kunna beräknas. Ett sätt att beräkna vegetationens produktivitet är med hjälp av satellitdata, baserat på till exempel "leaf area index" (LAI), vilket är ett mått på mängden grön biomassa per ytenhet, eller med hjälp av andelen absorberat fotosyntetiskt aktivt ljus (FPAR), vilken relaterar tillgängligt ljus för fotosyntes till mängd ljus som absorberats av växterna för fotosyntes. I /27-58/ sammanfattas det aktuella forskningsläget och möjligheterna att med hjälp av fjärranalys beräkna LAI, FPAR och primärproduktion. Rapporten ger också rekommendationer för fortsatt arbete inom SKB:s undersökningsområden i Forsmark och Oskarshamn. En beräkning av LAI har också gjorts vid platserna /27-59/. Biomassa och primärproduktion för fält- och bottenskikt, samt storleken på förnaskiktet har även samlats in i fält för olika vegetationstyper i Forsmark och Oskarshamn /27-60/. Studier av nedbrytningen av förna pågår.

Primärproduktionen och därmed också kolets kretslopp är beroende av jordtemperatur, jordfuktighet, mängden solljus och den dominerande vegetationen, till exempel tallskog, lövskog eller betesmark. Nedbrytningshastighet av död ved kan också variera /27-61, 27-62/. Detta har undersökts i ett examensarbete vid Lunds universitet /27-15/ vilket publicerats vetenskapligt /27-63/. Informationen är viktig för att förstå förändringar i omloppstider för radionuklider.

I terrestra ekosystem är omsättningen av radionuklider beroende av upptaget av ämnen via rötterna. Rottransport och upptag av olika ämnen i växter har undersökts i laboratorium vid Stockholms universitet /27-64/. Studien omfattade nio stabila element med olika egenskaper och visar att upptaget är beroende av växtens tillväxt och vattenupptag, se figur 27-6. Upptaget av olika element i svamp har också studerats i Forsmark /27-65/. Elementsammansättningen för olika organismer och marktyper har studerats vid platsundersökningarna /27-66, 27-67/. Resultaten från dessa studier bearbetas för närvarande /27-68, 27-69/ för att sedan användas för att simulera elementspecifika mekanismer. Liknande studier /27-70/, som genomförs i Posivas program i Finland, kommer att komplettera SKB:s databas. Rotbildningen och rotdjup är andra viktiga data som behövs vid simuleringarna. Hur djupt rötterna tränger ned i marken har studerats i platsundersökningarna /27-71 till



Figur 27-6. Illustration av resultat från laboratorieexperiment med upptag av jod i relation till vattenupptag, transpiration och tillväxt /27-64/.

27-73/. Resultaten har använts i SR-Can. Ett annat projekt studerar dynamiken i finrötternas bildning och årsdynamik vid båda platserna. Radionuklider transporteras vertikalt i marken (bioturbation) bland annat av djuren, till exempel dagmaskar. Detta har kartlagts vid båda platserna /27-74/.

Viktig information för att modellera de terrestra ekosystemen är markens egenskaper, som till exempel mineralsammansättning och topografi. De flesta studier har bedrivits vid platsundersökningarna som redovisas i avsnitt 27.10. Topografin styr fördelningen av in- och utströmningsområden i landskapet, vilket är av vikt för de geohydrologiska modellerna, se avsnitt 27.4, men också för landskapsutvecklingen. Utvecklingen av landområden, bildningen av sjöar och igenväxning av sjöar till våtmarker har simulerats i Gis /27-75/, och detta har varit ett underlag för SR-Can för att beskriva de båda platserna /27-6, 9-7/. Denna utveckling driver förändringarna i landskapsmodellen /27-8/.

Funktionen hos framtida myrar i Forsmark har utvärderats, se avsnitt 27.4. Tre områden är beskrivna och modellerade med avseende på jorddjup och hydrogeologiska egenskaper /27-76/. För att beskriva lagerföljden har verktyget Geoeditor, se vidare avsnitt 27.10, använts. Dessutom har lagerföljden och den kemiska sammansättningen, inklusive radionuklider, studerats i Klarebäcksmossen i Oskarshamns kommun för att beskriva urlakning och anrikning av radionuklider /27-14, 27-46/, se avsnitt 27.4. Myrar har också använts för att beskriva historiska klimatvariationer /27-13, 27-77, 27-78/, se vidare avsnitt 27.7.

I SR-Can beräknas storleken av den mest utsatta gruppen /27-1/ med hjälp av människans födointag i förhållande till produktionen av föda i de potentiellt kontaminerade ekosystemen /27-8, 27-11/. Produktionen av föda beräknas bland annat med ovan beskrivna modeller, men baseras också på de uppgifter som finns från platserna i dagens statistik /27-79, 27-80/ och historiskt /27-81, 27-82/. Detta har resulterat i en vetenskaplig publikation i temanumret i Ambio /27-10/.

Program

Inför SR-Site kommer den tillgängliga kunskapen från platsen att ställas samman och jämföras med annan kunskap om terrestra ekosystem i Sverige och övriga världen. I detta arbete förväntas insatser med att sammanställa vetenskaplig litteratur.

Radionuklidmodellen för skog kommer att kompletteras med kunskaperna om de viktigaste mekanismerna för radionuklidtransport. Dessa kommer från utvecklingen och känslighetsanalysen av Coupmodellen. Resultaten från studierna av rotzonen och förnedfallet kommer att komplettera skogsmodellen med viktiga data. Delar av modellen kan sedan vara möjlig att validera med data från kommande studie av åldern på organiska materialet i marken.

Myrar vid kanten av sjöar kommer att specialstuderas med avseende på interaktioner beroende på vattenståndsvariationer i sjöarna.

27.6 Akvatiska ekosystem

För de akvatiska ekosystemen, det vill säga rinnande vatten, sjö och hav, är kunskapen om de dominerande processerna för ämnestransport relativt goda /27-83, 27-84/. Figur 27-7 visar en schematisk bild av näringsväven i havet. Det viktigaste arbetet när det gäller dessa miljöer är att använda och utveckla modeller och modellverktyg som kan hantera kunskapen, och att samla in data från platserna för modellerna. Modellutvecklingen och transportprocesser beskrivs i tidigare avsnitt i detta kapitel och data från platsundersökningen beskrivs i avsnitt 27.10.

I många möjliga utströmningsområden kommer radionukliderna att passera ett sedimentlager. Därigenom kommer sedimenten i hav, floder och sjöar potentiellt att utöva ett starkt inflytande på transporten av radionuklider till biota. Sedimentets genomsläpplighet och adsorptionen påverkar spridnings- och spådningsmönstret. I gränsskiktet mellan sediment och vatten sker en markant förändring i redoxförhållanden, salthalt och biologisk aktivitet, vilket kan påverka radionuklidflödet. Kortsiktigt kommer dessa processer troligen att minska utflödet och ge lägre doser. Långsiktigt kan däremot radionuklider ackumuleras i sediment för att senare frigöras vid landhöjning, resuspension och dylikt, vilket kan ge förhöjda doser. Dessutom exponeras organismerna som lever i sediment för förhöjda halter som kan föras vidare i näringskedjorna, till exempel via fisk till människan.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 föreslogs en modellering av spridningsprocesser under och genom sediment, samt av omlagring och ackumulation av sediment, kompletterad med insamling av fältdata. Dessutom planerades en utveckling av en systemekologisk modell för sjöarna och en generell modell för radionuklidspridning för havsvikarna. Utveckling av en modell som beskriver sorptionsprocesser i rinnande vatten planerades också.

I granskningen välkomnade SSI särskilt studierna av sedimentens betydelse, men det var oklart hur forskningen passar in i ett större perspektiv.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Sedimenten har studerats på platserna, dels genom platsundersökningarna /27-85 till 27-89/ men också genom riktade forskningsinsatser /27-90 till 27-92/. Resultaten ger information om sedimentens skiktning /27-85 till 27-88, 27-92/, vilket ger möjlighet att mäta bildningshastighet och historia. Dessutom ger studierna värdefulla insikter om processer som omlagring och ackumulation av kemiska ämnen /27-88, 27-89/, till exempel genom bioturbation /27-91/. Sedimentdynamiken och omlagringsprocesser som funktion av strandlinjeförskjutningen har simulerats /27-75/, liksom betydelsen av sedimentens hydrauliska egenskaper /27-40, 27-41/ för hydrologin och sorptionen av ämnen /27-42, 27-43/. Dessa kunskaper har direkt omsatts i säkerhetsanalysen SR-Can, där historiken ger insikt i landskapsutvecklingen och hur sedimentbildning och sedimentens vattenomsättning påverkar olika ämnens ackumulation /27-6, 27-7/. Processerna i sedimenten är också betydelsefulla variabler i dosmodellerna /27-8, 27-93/.

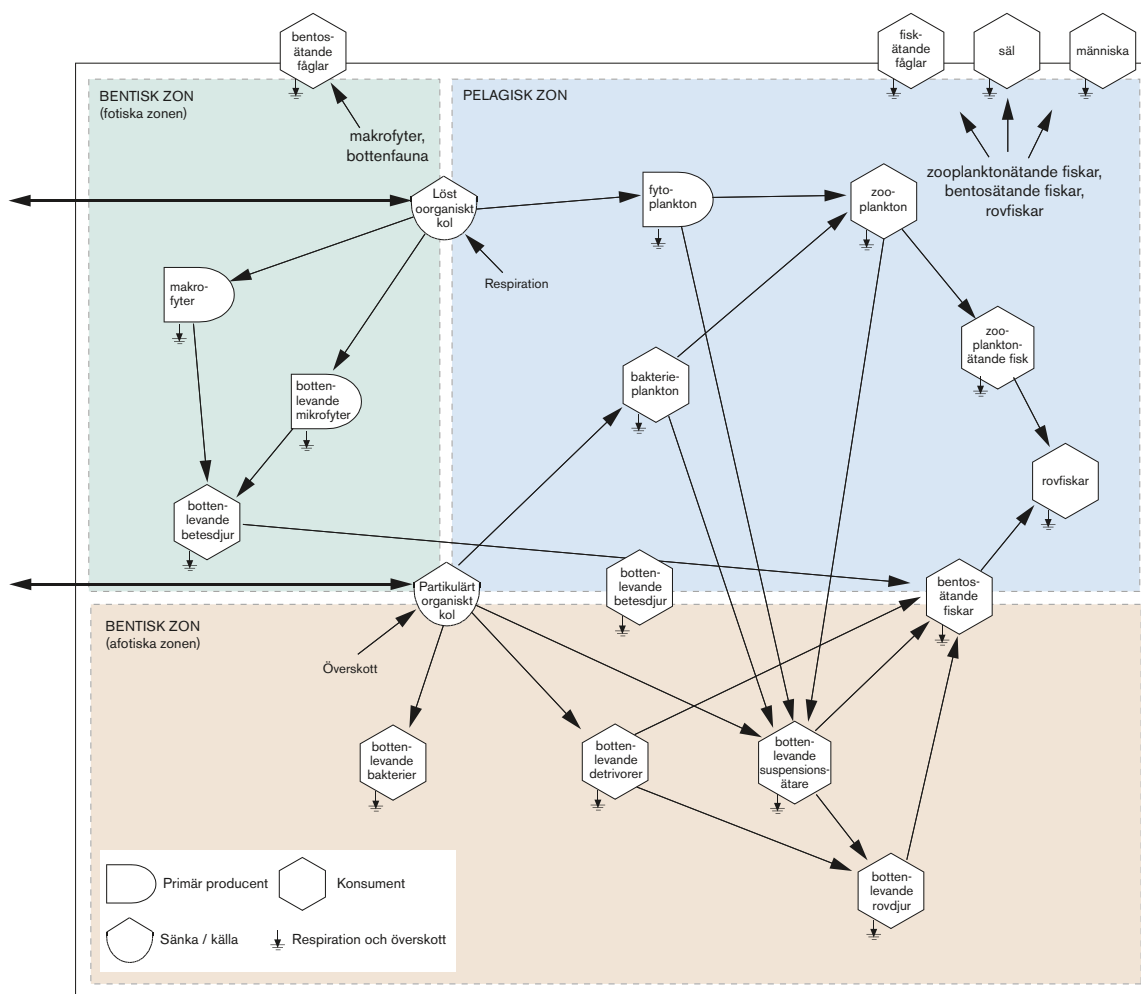
Kunskaperna om Forsmarksområdets unika kalkoligotrofa sjöar har dokumenterats i en doktorsavhandling vid Uppsala universitet /27-12/. Den innehåller bland annat en systemekologisk modell över Eckarfjärden i Forsmarksområdet /27-94/. Dessutom beskriver den betydelsen av sjöns botten som viktiga fallor för näringsämnen /27-95, 27-96/ och därmed även för många andra ämnen och radionuklider. I platsbeskrivningen för Laxemar gjordes en första sammanställning av materialflöden

i landskapet, där även massbalansen i sjöar beräknades /27-5/. Detta arbete har följts upp av flera massbalansmodeller som har gjorts för sjöarna vid platserna och publicerats i internationella tidskrifter /27-52, 27-94, 27-97/. Genom modelleringsarbetet har även en del nödvändiga kompletterande undersökningar identifierats /27-98, 27-99/.

För havet i Forsmark har det redan tidigare funnits ett bra underlag genom en doktorsavhandling /27-84/. Detta har kompletterats med en massbalans för vikarna i Oskarshamnsområdet /27-5, 27-48/. Flera arbeten som handlar om simulering av radionuklidens omsättning i havet har också publicerats i vetenskapliga tidskrifter /27-9, 27-50, 27-100, 27-101/. Ett annat arbete testar möjligheten att använda sig av en generell modell som till exempel Ecopath /27-25, 27-26/, vilken från början utvecklats för att beräkna fiskproduktionen i u-länder. En fältstudie vid Forsmark har genomförts där koncentrationen av 48 element mättes och jämfördes i olika delar av havets ekosystem, från vattnet, sediment, bottenlevande alger, plankton och fisk. Arbetet ger platsspecifik information om K_d och upptag i organismer av analogier till radionuklider.

För att kunna göra massbalanser och beräkna koncentrationer av radionuklider i havet används vattenomsättningsberäkningar som finns redovisade i platsbeskrivningarna /27-3, 27-5/. En jämförelse gjordes mellan två metoder för transportberäkningar i havet /27-49/, se avsnitt 27.4. Förutom jämförelsen som publicerades i temanumret av Ambio har även en vetenskaplig artikel publicerats i Deep Sea Research /27-102/. Den oceanografiska modellen används också av Svealands Kustvårds-vattenförbund för att beräkna vattenomsättningen i Stockholms skärgård, likaså har den använts för Ålands och Åbolands skärgårdar i Finland i EU-projektet Bevis /27-103/.

En ny modell för att beskriva radionuklidtransport i rinnande vatten har utvecklats /27-42/. Den inkluderar transporten utmed hela vattendraget. Studien kompletterades med en känslighetsanalys /27-43/.



Figur 27-7. En schematisk näringsväv i havet /27-48/.

Program

Inför SR-Site kommer den tillgängliga kunskapen från platsen att sammanställas i en rapport för sjöar och vattendrag och i en rapport om havet. I dessa kommer jämförelser att göras med annan kunskap om akvatiska ekosystem i Sverige och i övriga världen. Där kommer också en beskrivning av de viktigaste processerna att ingå. I detta arbete förväntas betydande insatser med sammanställningar av vetenskaplig litteratur.

En vidareutveckling av dosmodeller planeras för sjöar.

Myrar vid kanten av sjöar kommer att specialstuderas med avseende på interaktioner beroende på vattenståndsvariationer i sjöarna.

27.7 Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt

Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Salthalten påverkar vilka ekosystem som kommer att dominera i Östersjön och radionuklidernas speciering. Dessa faktorer är också viktiga randvillkor för transportmodellerna i geosfären. Strandförskjutningen påverkar vilket ekosystem som är dominerande i ett område. Vattenomsättning, grundvattenbildning och ytavrinning är viktiga fysikaliska faktorer som påverkar dosen. Dessa faktorer är mycket variabla. Variationsvidden kan studeras med modeller av dagens förhållanden och en rekonstruktion av förhållandena sedan senaste istiden.

I SR-Can tillämpas för första gången en dosberäkning för en mellanistid i landskapmodellerna och beräkningen av LDF /27-6 till 27-8, 27-104/. Strandlinjeförskjutningen är den drivande faktorn som beskriver utvecklingen efter istidens slut till cirka 8 000–10 000 år in i framtiden. Eftersom båda de studerade platserna ligger nära dagens kust är perioden runt dagens förhållanden de mest händelserika från utvecklingssynpunkt. Längre tillbaka i tiden befann sig platserna under havet och om cirka 5 000 år befinner de sig i en relativt stabil landmiljö. SR-Can visar också att de högsta doserna inträffar när platserna befinner sig ovanför havet, men att relativt få människor utsätts för dessa, beroende på att de ekosystemen i allmänhet ger en liten avkastning som föda.

I kapitel 21 beskrivs till stora delar effekter av förändringar under en mellanistid, till exempel strandlinjeförskjutning och isostatiska förändringar i avsnitt 21.3, permafrosttillväxt i avsnitt 21.4 samt klimat och klimatvariationer i avsnitt 21.5.

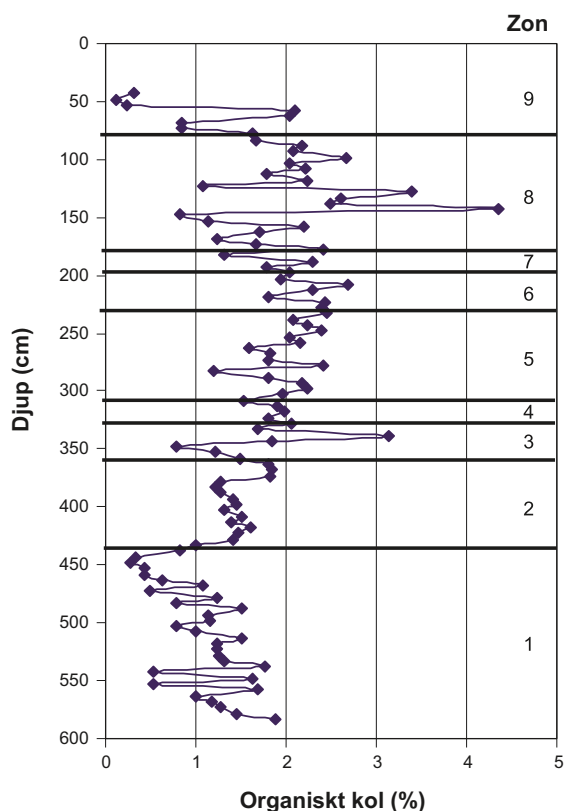
Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Fud-program 2004 planerade studier av klimatförändringar i Skandinavien under mellanistider i form av en sammanställning av information från genomförda studier, vilken redovisas i kapitel 21. Dessutom planerades en kunskapssammanställning om permafrost och tundrans betydelse för radionuklidtransport i biosfären, vilken inte genomförts ännu. Vidare avsågs att följa diskussionen om växthuseffekten för vilken det redovisas resultat i SR-Can.

Vid granskningen ansåg SSI att det är angeläget att belysa framtida havsnivåförändringar och huruvida dessa skulle kunna leda till frigörelse av ackumulerad aktivitet i havssediment.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

I kapitel 21 redovisas kunskaperna som erhållits sedan Fud-program 2004. Till det kan tilläggas en doktorsavhandling /27-13/, som delvis finansierats av SKB när det gäller myrar som klimatarkiv /27-78/ och en studie av en myr i Uppland i ett 150-årsperspektiv /27-78/. Dessutom har två sedimentkärnor analyserats vid Oskarshamn /27-87/ och Forsmark /27-86/. Sedimentkärnorna beskriver Östersjön cirka 4 000 år tillbaka i tiden, se figur 27-8.



Figur 27-8. Sedimentprofil från Gräsödjuprännan i Öregrundsgrepen, Forsmark. Organisk halt avsatt mot djupet i sedimentet. Zonering indelat med hjälp av diatomeeanalys som visar olika Östersjöstadier. Zon 1 motsvarar Yoldiahavet (cirka 11 000 år sedan), gränsen mellan zon 1–2 en cirka 4 000 år lång lagerlucka motsvarande Ancylushavet och början av Littorinahavet. Zon 2–9 motsvarar Littorinahavet /27-86/.

Program

Förutom de i kapitel 21 beskrivna klimatprogrammet där permafrosttillståndet ingår, planeras en beskrivning hur biosfären rimligen kan se ut vid platserna under permafrosten.

27.8 Internationellt arbete samt informationsspridning

I det internationella arbetet inom bland annat IAEA, EU, IRPA, ICRP och NKS diskuteras standarder, metodik och lagstiftning. Dessutom presenteras nya rön inom strålningsbiologi, natur- och miljövård samt systemekologisk forskning som är av betydelse för biosfärsarbetet. Det är också viktigt att förmedla SKB:s kunskaper internationellt för att erhålla synpunkter och vetenskaplig granskning.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 planerades ett aktivt deltagande inom EU-projektet Erica, Bioprota och International Union of Radioecology's (IUR) arbetsgrupp om avfall. Samarbetet med Posiva planerades att fördjupas, liksom en uppföljning av arbetet inom EU, NKS, ICRP och IRPA. Andra mål var att följa och presentera arbeten vid viktiga möten om strålningsbiologi, miljövård och systemekologi samt följa arbetet vid SKI och SSI. Dessutom var målet att presentera arbetet inom biosfären för intresserade forskare och studenter.

Myndigheterna påpekade i granskningen att det är viktigt att följa och delta i det internationella arbetet. SSI såg även positivt på att flera artiklar och avhandlingar som berör biosfärsarbetet har publicerats. Kasam höll med SKB om att kunskaperna ska fördelas till svenska forskare och internationellt för vetenskaplig granskning. Dessutom påpekade Kasam att regeringen bör uppmärksamma den pågående "avlövningen" av svensk forskning på området.

I det följande kan konstateras att myndigheternas önskan har uppfyllts. Dessutom ser SKB positivt på att regeringen har satsat på strålskyddsforskningen, med anslag till SSI som möjliggör en utlysning av högre forskartjänster inom radioekologi och strålskydd.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

SKB har fortsatt att medverka i EU-projektet Erica som slutrapporterades i mars 2007. SKB har varit aktiv i Bioprota och stöttat till exempel en sammanställning av bevattningsmodeller /27-105/, men också aktivt deltagit i att beskriva generella platsundersökningar /27-106/. SKB stöder en utvärdering av jods rörelser i en kanadensisk torvmosse. Inom Bioprota har SKB stöttat arbetet med en kritisk utvärdering av radionukliddata, till exempel överföringsfaktorer /27-107/. SKB har gett föredrag om läget i SKB:s biosfärsprogram vid de årliga mötena. Vidare har SKB deltagit i gruppen för radioaktivt avfall inom IUR som presenterade sin slutrapport i slutet av 2006 /27-108/.

SKB har försökt följa arbetet i IAEA program Emras (Environmental Modelling for Radiation Safety), men har inte aktivt deltagit i diskussionerna vid mötena eftersom både Erica och Bioprota har haft överlappande arbete med Emras. Kommande rapporter från Emras ser ut att vara värdefulla, speciellt uppdateringarna av radionuklidspecifika data.

Samarbetet med Posiva har fortsatt, till exempel genom gemensam utveckling av modellverktyg /27-19/. Posivas biosfärsprogram /27-109/ har utvecklats kraftigt de senaste åren och även formellt samarbete har skett /27-110/.

SKB deltog i symposiet Ecorad 2004 med tre föredrag och två posters. SKB:s medarbetare har presenterat SKB:s arbete vid många andra symposier både internationellt, till exempel IEMS Japan, Setac Europe, American Nuclear Society /27-111/ och nationellt, till exempel Svenska Havsforskarföreningen och Oikos. SCK i Belgien har också haft symposier där SKB har blivit inbjudna att bidra med presentationer /27-112, 27-113/.

Publiceringen i internationella tidskrifter finns omnämnd under respektive avsnitt. Nästan 30 vetenskapliga artiklar har publicerats sedan Fud-program 2004. Temanumret av Ambio innehåller elva artiklar. Temanumret inleds med en introduktion om strategin för platsbeskrivningar /27-114/, en artikel behandlar hydrologin /27-36/ och en artikel oceanografi /27-49/. Flera artiklar handlar om omsättningen av organiskt kol, i skogen /27-51, 27-53/, i sjöar /27-52, 27-97/ och i hav /27-48/. En artikel sammanfattar omsättningen av organiskt material i hela landskapet /27-50/, och en beskriver det brukade landskapet historiskt, i nutid och framtid /27-10/. Slutligen beskriver en artikel hur kunskapen har omsatts för att beräkna doser i säkerhetsanalysen /27-115/.

Program

SKB fortsätter att delta som partner i Bioprota. Dialogen och utbyte av data kommer att fördjupas med Posiva. SKB planerar för närvarande inte något arbete i EU-projekt när det gäller biosfären, men kommer eventuellt att ingå i referensgrupper för fortsättningen av Erica-projektet kallat Protect, samt för Futuræ. SKB planerar att fortsätta följa Emras och försöka aktivt engagera sig i beskrivningen av tillgängliga modeller.

Publiceringen i vetenskapliga tidskrifter kommer i fortsättningen att uppmuntras liksom aktivt deltagande i symposier, till exempel Icem (International conference on environmental remediation and radioactive waste management) och International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, Norge. Föreläsningar och seminarier vid universiteten förväntas fortsätta.

27.9 Redovisningen av biosfären i säkerhetsanalysen

Biosfärsforskningsprogrammet, som är beskrivet i tidigare avsnitt, syftar till att ge ett underlag för att kunna genomföra säkerhetsanalyser med ett vetenskapligt underlag. En av de viktigaste insatserna är att uppnå tillräcklig förståelse för processer och fenomen för att kunna förenkla och göra numeriska modeller som behövs för dosberäkningar. Utöver detta ger forskningen information om generella data och osäkerheter i data som behövs för modellerna och som kompletterar platsdata.

Under åren har redovisningen av biosfären i SKB:s säkerhetsanalyser utvecklats från en pessimistisk doskonverteringsfaktor för en brunn till en ökad realism med flera olika recipienter motsvarande olika typer av ekosystem. Myndigheternas krav har också ökat för biosfären.

Vid den senaste säkerhetsanalysen SR-Can har en omfattande förändring skett när det gäller metodik för att beräkna doser och utnyttja platsspecifik information från platserna.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att det saknas tydliga kopplingar mellan platsundersökningar och modellutveckling liksom en komplett beskrivning av modeller som ska användas i säkerhetsanalysen. Det framgick inte tydligt hur biosfärsprogrammets delar samordnas för att möta säkerhetsanalysens behov. I biosfärsforskningen bör SKB beakta möjligheten att använda koncentrationer och flöden av radionuklider som komplementära säkerhetsindikatorer.

SKI och SSI ansåg att SKB bör klargöra hur skyddet av miljön tas omhand i modellutvecklingen och i platsundersökningarna. Påståendet att redan insamlade data från platserna vida överstiger behovet som anges i EU:s projekt Fasset behöver visas.

SSI såg positivt på att SKB tänker undersöka hur stor population som kan beröras av ett kontaminerat område, men anser att det brådskar. Kasam påpekar att det finns osäkerheter i hur SSI:s föreskrifter om miljöövervakning ska tillämpas.

I stort sett finns dessa frågor besvarade i SR-Can, som myndigheterna för nuvarande granskar. I den följande sammanfattningen återfinns några av dessa svar.

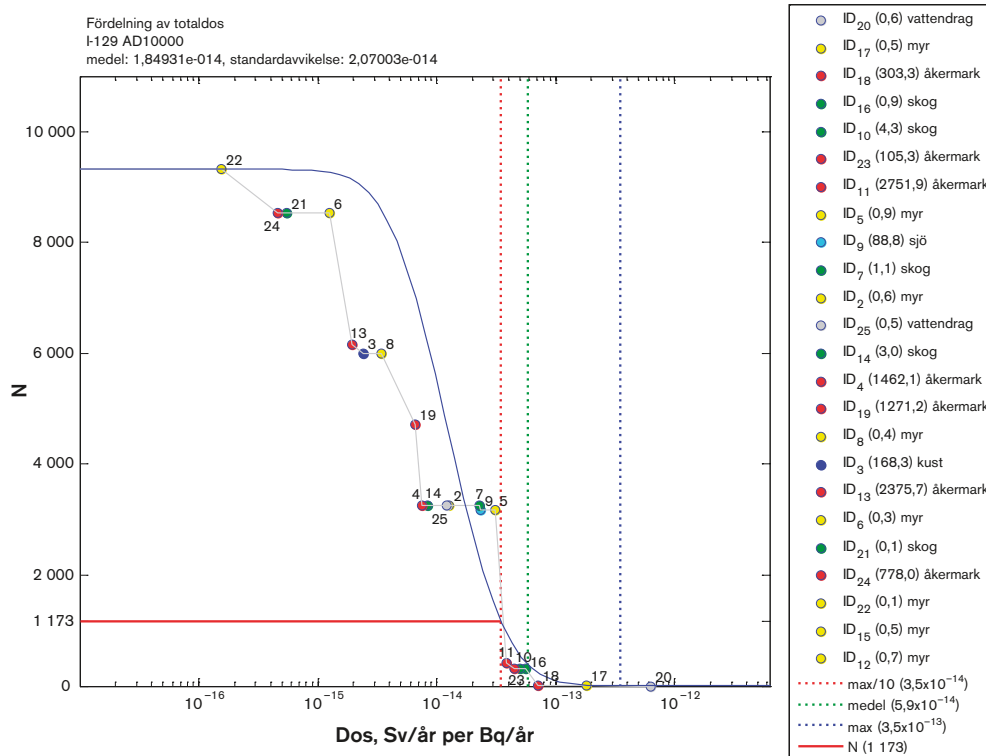
Nyvetenskap sedan Fud 2004

SR-Can är som tidigare nämnts ett genombrott för hur biosfären behandlas i SKB:s säkerhetsanalyser och betraktas internationellt som ett nytänkande vad gäller dosmodellering /27-116/. Genom SR-Can har ett stort steg framåt för behandlingen av biosfären skett och för första gången har platsdata i stor utsträckning använts i modellerna. Dos och storleken på populationen har redovisats på ett nytt sätt. Dessutom har en ny typ av doskonverteringsfaktorer (LDF) som baseras på befintlig kunskap om platserna använts. Landskapsmodellerna ger möjlighet att koppla samman olika biosfärsobjekt i avrinningsområdet, vilket möjliggör att flera utsläppspunkter kan summeras i till exempel sjöar nedströms. Likaså kan eventuell ackumulation av radionuklider i områden nedströms från utströmningspunkterna upptäckas /27-8/. Vid beräkningen är det möjligt att definiera den mesta utsatta gruppen. Med utgångspunkt från områdets avkastning av föda kan populationen beräknas och hur många som erhåller olika doser, se figur 27-9.

Landskapsmodellerna är platsspecifika och data från platserna används i så stor utsträckning som möjligt /27-6, 27-7/. Höjdmodellen för platsen är betydelsefull för att klassificera framtida ekosystem och deras storlek. För SR-Can har en del ekosystemmodeller uppdaterats /27-27, 27-93/ liksom radionuklidspecifika data för doskonvertering, K_d och överföringsparametrar /27-11/. Simuleringsverktyget har också uppdaterats till Pandora i samarbete med Posiva /27-19/, se avsnitt 27.3.

Program

Det fortsatta programmet inför SR-Site är att utveckla modeller som använder elementflöden och ersätta eller komplettera överföringsfaktorer med mekanistiska modeller, se vidare modellutveckling. Sensitivitetsstudier av landskapsmodeller kommer att underlätta att prioritera väsentliga parametrar och ge en översyn av om modellerna fångar väsentliga förlopp. SR-Can identifierade insatser för att karakterisera andra klimattillstånd i biosfären, se vidare avsnitt 27.7, och alternativa utvecklingar av våtmarker från en havsvik, se avsnitt 27.5.



Figur 27-9. Den exponerade kumulativa populationen avsett mot dosomvandlingsfaktorn, det vill säga figuren visar hur många människor som erhåller en viss dos under sin livstid vid ett enhetsutsläpp av 1 Bq/år vid ett förvar i Forsmark kring år 10 000. Numren i figuren anger ekosystem och antal människor. Den heldragna linjen är en lognormal anpassning till data och de vertikala streckade linjerna anger den högsta doskonverteringsfaktorn för en människa samt 1/10 av det högsta värdet. Den vågräta linjen anger antal människor (1 173 stycken) som erhåller mellan den högsta och 1/10 av dosen /27-8/.

27.10 Stödjande forskning för platsundersökningsprogram

För att stödja utvecklingen av dosmodeller samt för att ge plats-specifika data till säkerhetsanalyserna behöver data samlas in vid platsundersökningar. I ovanstående stycken har flera exempel givits. Inom forskningsprogrammet har metoder utvecklats samtidigt som tillgängliga kunskaper och resurser sammanställts. Målet är dock att huvuddelen av datainsamlingen till platsbeskrivningarna sker inom SKB:s platsundersökningsorganisation. Platsundersökningsprogrammet innebär en av de mest omfattande datainsamlingar som har utförts i Sverige av samtidigt uppmätta parametrar för en avgränsad plats. I en rapport /27-117/ angavs variabler och parametrar som bedömdes vara viktiga att samla in vid en platsundersökning. I /27-118/ beskrivs hur data ska användas i platsmodelleringar och beskrivningar. En samordning har även gjorts med geosfärsprogrammet för att finna gemensamma behov av data för randvillkor, underlag för miljökonsekvensbeskrivningen, samt underlag för framtida övervakningsprogram samt åtgärder för att minska miljöstörning vid platsundersökning. Stor vikt har också lagts vid att identifiera påverkan mellan olika undersökningar.

Programmet för platsundersökningar framgår i /27-119/ och de senaste sammanfattande resultaten kan hittas i version 1.2 av den platsbeskrivande modellen /27-3 till 27-5/ för de ytnära ekosystemen för respektive plats. Platsbeskrivningarna bygger på en rad underlagsrapporter som beskriver de olika delarna i ekosystemen, till exempel vegetation, fauna, topografi, klimat, hydrologi, markanvändning och avlagringar.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI ansåg att det var oklart när exempelvis kritiska resultat och modeller måste vara framtagna med hänsyn till platsundersökningarnas behov. SSI skrev att kopplingen mellan data från platsundersökningarna och de krav som de platsanpassade ekosystemmodellerna och modellerna för

övergången mellan geosfär och biosfär ställer måste vara tydlig. I SR-Can-rapporten med underlag och i avsnitt 27.4 återfinns resultaten som svarar på dessa frågor.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

Forskningens stöd till platsundersökningar har framför allt varit att delta i nätverket för ytekologisk modellering och beskrivning (SurfaceNet), samt att utbilda och identifiera experter som medverkar vid platsbeskrivningarna. Dessutom har forskningen utvecklat metodik och verktyg som använts vid platsundersökningar och modellering. Ett exempel är Geoeditor /27-76/ som används för att beskriva lagerföljden på båda platserna /27-5, 27-76, 27-120/, och där beskrivningen sedan går att direkt använda i det hydrologiska verktyget Mike She /27-33 till 27-35, 27-38, 27-39/. Forskningsprojekt har också bedrivits vid platserna. Under arbetet med projekten har man samlat in viktiga data, till exempel den marina elementsammansättningen (se avsnitt 27.6), viktiga rotdata (se avsnitt 27.5), radionuklid- och elementprofiler i en myr /27-14, 27-46/ (se avsnitt 27.4) eller sedimentprofiler i sjöarna i Forsmark /27-92/. En doktorsavhandling har studerat sjöarna i Forsmarksområdet och gett viktiga platsdata och utvecklat metodik som använts vid platsundersökningarna /27-12/, se avsnitt 27.6. En viktig uppgift har varit att initiera och stödja den vetenskapliga publiceringen av de kunskaper som tagits fram under SurfaceNets arbete med platsbeskrivningar och datainhämtning genom temanumret i den vetenskapliga tidskriften *Ambio* (volym 35, nummer 8) /27-10, 27-36, 27-48 till 27-53, 27-97, 27-114/, se även avsnitt 27.8.

Forskningen och säkerhetsanalysen har erhållit viktig information från platsundersökningarna och platsbeskrivningarna, många redan nämnda i tidigare avsnitt. I platsbeskrivningen /27-121, 27-122/ finns resultaten sammanfattade. I SR-Can har sedan data använts, vilket finns redovisat i /27-6, 27-7/.

Bland annat har platsundersökningarna och modelleringarna i samband med platsbeskrivningarna gett nya insikter som har ökat förståelsen för olika processer i ytekosystemen. Mängden och förekomsten av däggdjur ger indata till kolflödesmodeller och därmed beräknas potentiellt födoval som har använts för att analysera antalet människor som kan få sin föda från de olika ekosystemen vid platserna /27-123 till 27-126/. Människans villkor i områdena har studerats. I en studie gjord av Kulturgeografiska institutionen vid Stockholms universitet undersöktes historisk markanvändning och produktion, bosättningar, samt övrig påverkan på landskapet på platserna. Stora delar av undersökningen analyserades och presenterades med hjälp av Gis /27-81/, se figur 27-10. En sammanställning av dagens natur- och kulturvärden (inklusive socio-ekonomiska) på platserna har också genomförts, vilket är viktig information för miljökonsekvensbeskrivningen /27-127/.

En viktig del i ekosystemmodelleringarna är den diffusa övergången från geosfär till biosfär, där de övre marklagren och jordmånsskiktets egenskaper är avgörande för de ytliga ekosystemens transport av ämnen, se vidare avsnitt 27.4 och 27.5 /27-54, 27-120, 27-128, 27-129/. Därför har ytterligare analyser gjorts när det gäller jordarter, jorddjupet och de sedimentära avlagringarna på respektive plats. För att få ytterligare kunskap om ekosystemprocesser har omfattande undersökningar av vegetationsförhållanden, markhydrologi, jordartsgeologi, pedologi, samt markprovtagning för laboratorieanalyser av fysikaliska och kemiska förhållanden genomförts i samarbete med SLU /27-71/.

Den platsspecifika kunskapen om de akvatiska systemen i områdena har förbättrats genom en rad undersökningar. De ytvattenkemiska undersökningarna utanför Forsmark har följts upp och förbättrats /27-130/. Likaså har mängden klorofyll i plankton analyserats för att kunna användas i ekosystemmodelleringen /27-131/. I en undersökning uppskattas produktion och respiration av organiskt kol på olika typer av botten i Bolundsfjärden /27-132/. En inventering av växt- och djursamhället och uppskattning av biomassa i anslutning till platsundersökningsområdet i Forsmark har också genomförts /27-133 till 27-136/.

Program

Huvudsakligen kommer forskningen att koncentrera sig på att komplettera kunskap om olösta frågor, vidareutveckling av analysmetodik, samt vetenskaplig publicering av erhållna data. Resultaten från platsundersökningar och analyser av dessa resultat inom platsmodelleringen kommer att användas för de forskningsprogram och den säkerhetsanalys som beskrivs i de övriga avsnitten.



Figur 27-10. Överst: Karta från år 1680 över området runt torpet i Laxemarområdet. Nederst: Foto från i dag på fältet vid Torpet /27-83/.

28 Andra metoder

Förutom KBS-3-metoden studerar SKB även andra metoder för att ta hand om använt kärnbränsle som transmutation och deponering i djupa borrhål. Dessa metoder beskrivs i avsnitt 28.1 respektive 28.2.

28.1 Separation och transmutation

Transmutation – omvandling av långlivade ämnen till stabila eller kortlivade ämnen – sker i första hand med neutroner i en kärnreaktor, det vill säga samma kärnreaktioner som förekommer i en vanlig kärnreaktor. För transuraner är det i första hand kärnklyvning (fission) som ger en effektiv omvandling. För andra långlivade nuklider är det neutroninfångning. Vid kärnklyvning utvecklas stora mängder energi som kan utnyttjas till exempel för elproduktion.

Syftet med transmutation är att avsevärt minska den mängd av långlivade radionuklider som måste slutförvaras. Ett tekniskt mål som ibland anges för transmutation är att minska mängden långlivade radionuklider med en faktor 100. Om detta lyckas skulle radiotoxiciteten hos det kvarvarande högaktiva avfallet efter cirka 500 år ligga på en nivå jämförbar med den som använt kärnbränsle har efter cirka 100 000 år. De kvarvarande långlivade ämnena skulle dock fortfarande kräva ett geologiskt slutförvar.

För att processen ska nå sitt syfte fordras att de långlivade ämnen som ska transmuteras skiljs från kvarvarande uran. I annat fall kommer det att bildas nya långlivade ämnen genom kärnreaktioner mellan uran och neutroner, det vill säga på samma sätt som transuranerna förut bildats (neutroninfångning) i de vanliga reaktorerna. För en lättvattenreaktor utgör uran cirka 95 procent av kvarvarande bränsle. Upparbetning (och separation av olika ämnen) är således en förutsättning för transmutation. Man talar därför ofta om separation och transmutation (S&T) som ett begrepp eller vanligare på engelska – partitioning and transmutation (P&T).

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

I Fud-program 2004 /28-1/ konstaterades att en effektiv transmutation förutsätter ett system baserat på snabba neutroner. Detta kan antingen vara en snabbreaktor med självunderhållande kedjereaktion eller ett acceleratordrivet system (ADS), där själva kärnreaktorn är underkritisk och tillförs neutroner från en neutronkälla som drivs av en protonaccelerator. I Fud-program 2004 ges en översiktlig beskrivning av systemet.

Vidare konstaterades att för upparbetning och separation finns två huvudlinjer, dels en vidareutveckling av extraktion mellan en sur vattenbaserad lösning och en organisk lösning det vill säga den process som används i existerande industriella upparbetningsanläggningar, dels utveckling av pyrokemiska separationsprocesser. Fördelen med de senare är framför allt att de är mindre känsliga för strålningen från det högaktiva materialet. Å andra sidan kräver de mer utveckling och de högre temperaturerna innebär potentiellt större risker.

Några viktiga slutsatser i Fud-program 2004 var följande:

- Det finns ingen konsensus mellan experter om vilken teknisk inriktning man bör följa för viktiga delar av ett S&T-system.
- Intresset för S&T är huvudsakligen koncentrerat till forskningslaboratorier i USA, Europa, Japan och några andra länder. Universiteten i många länder inklusive Sverige visar också stort intresse för S&T. Flera viktiga program pågår vid universitet och forskningslaboratorier i många länder. Forskningen tilldrar sig betydande intresse bland forskare och studenter inom kärntekniska vetenskaper.
- Kärnenergiindustrin har endast visat ett begränsat intresse för denna utveckling. Det är huvudsakligen märkbart i Frankrike och några andra länder med stora kärnkraftprogram. Kärnenergiindustrins långsiktiga intresse är mer fokuserat på nya typer av reaktorer – ofta kallade Generation IV.

- De nationella och industriella insatserna för använt kärnbränsle och högaktivt avfall i nästan alla länder är (och bör vara) fokuserade på att lösa frågor kring geologisk slutförvaring. Trots förseningar och bakslag i många länder är utsikterna att nå detta mål mycket bättre och ligger mycket närmare i tiden än det mycket långsiktiga och kostsamma målet att utveckla, implementera och driva S&T effektivt.
- En sammanvägning av dessa olika omständigheter leder till slutsatsen att det är osannolikt att ADS-anläggningar i industriell skala kan tas i bruk före år 2050.
- En framgångsrik utveckling av S&T kommer inte att göra geologisk förvaring föråldrad. De komplexa processerna kommer oundvikligen att ge visst avfall med långlivade radionuklider. För detta avfall behövs ett geologiskt slutförvar. En framgångsrik utveckling kan emellertid dels minska kraven på de tekniska barriärerna i slutförvaret och dels minska volymerna.
- För svensk del är det viktigt att följa den internationella utvecklingen och att upprätthålla en rimlig kompetens inom landet så länge som en betydande andel el produceras med kärnkraft. Kompetens utvecklad genom forskning och utveckling på området S&T är värdefull och användbar, även i arbetet att underhålla och utveckla säkerhet och bränsleförsörjning för de existerande lättvattenreaktorerna. Den är också viktig för att bedöma den fortsatta utvecklingen av kärnavfallshanteringen
- Såsom redan nämnts kan utvecklingen av S&T för tillämpning i stor skala förväntas ta flera decennier. För att sedan transmuttera allt kärnbränsle från de nu existerande kärnreaktorerna kommer det att krävas ytterligare åtminstone 100 år. S&T i industriell skala kräver stora kärntekniska anläggningar som måste accepteras av samhället.
- Införande av S&T för att effektivt reducera den mängd långlivade radionuklider som måste slutförvaras i ett geologiskt slutförvar kräver således en bindning till kärnenergi för mycket lång tid.
- Kostnaderna för S&T är inte möjliga att förutse med någon god säkerhet innan systemen definieras och provats bättre. De uppskattningar som gjorts pekar på elproduktionskostnader som ligger mellan 10 och 50 procent över den från dagens lättvattenreaktorer. De investeringar som krävs i forskning och utveckling och i nya anläggningar är omfattande. De är dock utspridda över lång tid och större delen får ses som investeringar i energiproduktion. Det är inte ekonomiskt rimligt att genomföra S&T utan att nyttiggöra energin. Detta gäller framför allt transmutation av plutonium. Vissa experter anser att man kan bygga mindre ADS-anläggningar för transmutation av americium, curium och neptunium.

Granskningen av Fud-program 2004 gav inga avvikande synpunkter på de slutsatser som redovisats i programmet. Inte heller lämnades några synpunkter på SKB:s mål för insatserna på separation och transmutation. Kasam noterade att det är rimligt att SKB följer och stödjer forskning och utveckling om transmutation inom och utom Sverige. Vidare påpekar Kasam att med hänsyn till eventuella framsteg med transmutation bör förvaret byggas så att bränslet kan återtas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

En referensgrupp av svenska forskare har på uppdrag av SKB utarbetat en rapport om läget för forskningen över S&T i början av 2007 /28-2/. Underlaget för den följande korta sammanfattningen av kunskapsläget är hämtad från denna rapport. Rapporten sammanfattar utvecklingen sedan 2004 då en liknande rapport utarbetades för SKB:s räkning /28-3/. För en utförligare redovisning av kunskapsläget hänvisas till dessa rapporter. Se även årsrapporterna /28-4 till 28-12/.

Den gradvisa ökning av forsknings- och utvecklingsinsatserna för separation och transmutation, som skedde internationellt under perioden 1990–2003, har inte fortsatt efter 2003. Det finansiella stödet från EU-kommissionen till S&T-projekt inom unionen har planat ut och det är oklart vilket stöd som kommer att bli tillgängligt inom framtida program. Forskning kring S&T har emellertid alltjämt en framträdande roll inom programmet för framtida kärnkraft och kärnbränslecykler. Internationellt fokuseras detta inom det samarbete kring avancerade reaktorer som benämns Generation IV.

Forskningen inom transmutation koncentreras på omvandling av transuraner medan intresset för klyvningsprodukter är ett sidospår. Flera studier påpekar dock att om man tar bort aktiniderna samt cesium och strontium kan man uppnå en kraftig minskning av volymbehovet för ett slutförvar för det

högaktiva avfallet. Det är dessa ämnen som svarar för den allt övervägande delen av resteffekten i det använda kärnbränslet.

Det krävs ett snabbt neutronspektrum för att man ska erhålla en effektiv transmutation av transuraner. Det tidigare starka intresset för acceleratordrivna system (ADS) har minskat något till förmån för snabba reaktorer. ADS ses numera i huvudsak som ett instrument för transmutation av americium och curium, om man skulle vilja göra detta separat. Man talar om en "double strata"-bränslecykel där energiproduktionen sker i lättvattenreaktorer och snabba reaktorer, medan de tyngre transuranerna transmutteras i ADS. I ett energiproduktionssystem baserat på snabba blyreaktorer är det dock möjligt att förbränna även americium och curium. ADS skulle i så fall vara av intresse endast under en interimperiod.

Utveckling av ADS drivs i Europa främst inom EU-projektet Eurotrans. Detta startade år 2004 och ska slutföras under 2007. Eurotrans är ett integrerat projekt omfattande fem så kallade domäner: design, experiment avseende kopplingen mellan en accelerator och underkritisk reaktor, bränsle, material samt kärndata. Designstudierna avser dels en experimentanläggning (XT-ADS) med bly-vismut-kyllning på cirka 60 MW termisk effekt, dels en anläggning i demonstrationsskala på cirka 400 MW termisk effekt med blykyllning. Säkerhetsanalyserna inom denna del koordineras av KTH. KTH medverkar även inom domänerna två till fyra inom Eurotrans.

Experimenten avseende koppling mellan en accelerator och reaktor planerades ske i Italien, men fick läggas ner då den italienska finansieringen inte godkändes. Resurserna för dessa studier har nu omfördelats till tre andra projekt i Belgien, Ryssland och USA. Arbetena inom detta område är starkt försenade och startar 2007. Det är tveksamt om denna domän kan uppnå de mål som angavs i projektplanen på grund av att det för närvarande saknas lämpliga faciliteter för att på ett relevant sätt studera kopplingen.

Inom bränsledomänen planeras bestrålning av americiumbränsle i den franska reaktorn Phénix. Bestrålningen ska börja våren 2007 och fortsätta tills reaktorn ställs av 2009. Det plutonium-nitridbränsle som tillverkades inom projektet Confirm (EU:s femte ramprogram) och som skulle ha bestrålats i Studsviksreaktorn R2 kommer nu att bestrålas i den holländska reaktorn i Petten.

Inom materialdomänen studerar man framför allt korrosionsproblemen vid bly-vismut-kyllning. För bränsle provar man ett ferritiskt stål pläterat med en tunn beläggning (20 mikrometer) av järn och aluminium.

Insatserna på området kärndata är väsentligt mindre inom Eurotrans än inom det tidigare ramprogrammet. Ett mindre experiment har utförts i Uppsala.

Forskningen inom separation är som nämnts inriktad mot två huvudlinjer: vattenkemiska processer och pyrokemiska processer. I Europa samlas insatserna inom EU-projektet Europart, som startade 2004 och avslutas i juni 2007. Detta är ett så kallat integrerat projekt inom det sjätte ramprogrammet och utgör en fortsättning på projekten Partnew, Calixpart och Pyrorep inom det föregående ramprogrammet. Partnew inriktades på separation av aktinider och lantanider från vattenbaserade lösningar med vätskeextraktion och användning av kväveavgivande ligander som till exempel malonamider. Calixpart handlade också om vätskeextraktion av vattenlösningar, men baserat på calixarener. Pyrorep studerade pyrokemiska metoder för separation i salt- eller metallsmältor.

Europart uppdelas i nio arbetspaket varav fem inom hydrometallurgi och fyra inom pyrometallurgi. En kort översikt av projektet finns i lägesrapporten /28-2/. I projektet deltar 24 olika organisationer i elva EU-länder samt Australien och Japan. Från Sverige medverkar kärnkemigruppen vid Chalmers. Den svenska forskningen om separation är för närvarande väl integrerad med EU-projekten /28-9/.

Forskning om separationsprocesser för transmutation har gjort viktiga framsteg på senare år. I vissa fall har man till och med lyckats separera americium och curium. Det återstår dock många utmaningar. Inom hydrometallurgi har man uppnått tillräckligt bra fördelningsfaktorer och separationsfaktorer. Fokus riktas nu mot att utveckla en fungerande process. Sökandet efter ligander, som ger tillräckligt bra extraktion och separation, kommer att fortsätta men med mycket lägre intensitet. Tonvikten kommer i stället att ligga på att förbättra stabiliteten mot radiolys och hydrolys. Detta kan ske antingen genom tillsatser till lösningsmedlet eller genom val av lämpligt lösningsmedel. Utvecklingen av processer och utrustning behöver intensifieras.

Inom pyrometallurgi pågår forskning om bland annat återvinning av uran och om metoder att ta bort klyvningsprodukter med stora neutronabsorptionstvårsnitt. Syftet är att undvika separation av plutonium från andra transuraner för att därigenom förenkla safeguardsproblemet. Det framtida arbetet fokuseras mot förbättrad selektivitet och mot teknisk utveckling. Utformningen av processer och utrustning är besvärlig med hänsyn till smältornas aggressiva egenskaper och de relativt höga temperaturer som krävs.

Tillverkning av bränsle för transmutation och upparbetning av transmutationsbränsle kräver en betydande utveckling, som inte kan genomföras fullt ut innan man har definierat vilket bränsle som ska användas för transmutationen. Utveckling av denna del av en avancerad bränslecykel kommer således att kräva ytterligare tid.

Konsekvenserna av transmutation och separation, tillämpat på använt kärnbränsle vid utfasning av de nuvarande svenska kraftreaktorerna, har studerats i en rapport framtagen på uppdrag av SKB /28-13/. Studien baseras på en analys av olika scenarier /28-14/. En slutsats av studien är att de långa led- och drifttiderna som är förknippade med transmutation medför att ett ansvar överförs på kommande generationer i flera led. Det är därför tveksamt om transmutation som strategi för slutligt omhändertagande i ett utfasningsscenario uppfyller kraven i IAEA:s avfallskonvention, det vill säga att otillbörliga bördor inte ska läggas på kommande generationer. Även om separation och transmutation kan göras effektiv återstår avfall som måste tas omhand och slutförvaras. Transmutation är således inte i sig ett alternativ till slutförvaring. Transmutation förutsätter fortsatt kärnenergiproduktion i tidsskalan 100 år eller mer. Det framstår möjligen som ett realistiskt alternativ i ett långsiktigt perspektiv där man bygger en väsentlig del av energiförsörjningen på nya typer av kärnreaktorer som ersätter de nuvarande. Härav följer krav på en långsiktig satsning på kärnteknik och transmutation vilket i sin tur ställer krav på långsiktiga energipolitiska beslut.

Kasam redovisar i sin kunskapslägesrapport /28-15/ en genomgång av transmutationstekniken. De allmänna principerna för S&T beskrivs. Vidare ges en sammanfattning av kunskapsläget samt av pågående och planerad forskning. Tre olika scenarier diskuteras ur svenskt perspektiv:

- Ett exklusivt svenskt system för transmutation.
- Ett system där Sverige helt förlitar sig på teknik och resurser utvecklade i andra länder.
- Separation och bränsletillverkning utomlands, transmutation i Sverige.

I den avslutande delen av redovisningen diskuteras fördelar och nackdelar med S&T. Kasam drar följande allmänna slutsatser:

Utnyttjandet av transmutation för det svenska kärnavfallet blir en fråga för kommande generationer. Med dagens kunskap om denna teknik är det inte acceptabelt att avbryta eller senarelägga det svenska slutförvarsprogrammet, med hänvisning till transmutation som ett möjligt alternativ. Däremot stärker detta möjliga framtida alternativ kravet på att förvaret ska utformas så att återtagning av avfall blir möjligt. Enligt de etiska principer, som bland andra Kasam ställt upp, bör varje generation ta hand om sitt eget avfall och inte tvinga framtida generationer att utveckla ny teknik för att lösa problemen. Därför är det rimligt att resurser avsätts för fortsatt forskning om transmutation. Denna forskning kan även ge utbyte, som är av värde inom andra områden, t ex kärnfysik, kemisk separationsteknik och materialteknik. Den svenska transmutationsforskningen bör samordnas med den forskning och utveckling som sker i andra länder. Att nu avsätta resurser för fortsatt transmutationsforskning ligger också i linje med synsättet att vår generation bör ge kommande generationer bästa möjliga förutsättningar att avgöra om de vill välja transmutation, som metod för att ta hand om det använda kärnbränslet, i stället för enbart direktdeponering (enligt t ex KBS-3-metoden).

Program

Målet för SKB:s forskning rörande separation och transmutation av långlivade radioaktiva ämnen är oförändrat att:

- Granska hur denna teknik utvecklas och hur den kan komma att påverka avfallsströmmar från kärntekniska anläggningar och deras nuklidinnehåll.
- Bedöma om och i så fall hur och när detta kan utnyttjas för att förenkla, förbättra eller utveckla ett system för att slutligt ta om hand kärnbränsleavfallet från de svenska kärnkraftverken.

Underlag tas fram fortlöpande enligt årliga verksamhetsplaner. Samlade bedömningar sker inför viktiga beslut i kärnavfallsprogrammet.

SKB:s insatser görs i huvudsak som stöd till pågående forskning vid universitet och tekniska högskolor. Denna forskning sker i brett internationellt samarbete framför allt inom EU genom aktiv medverkan i projekt finansierade inom EU:s periodiska ramprogram.

Intresset för utveckling av acceleratordrivna system (ADS) har minskat något på senare år parallellt med att insatserna för den så kallade fjärde generationens reaktorsystem (GEN-IV) har ökat. Dessa system innefattar bland annat snabba reaktorer med eller utan så kallad bridning. Snabba reaktorer har samma potential för effektiv transmutation som ADS. En annan utvecklingslinje inom GEN-IV är gaskylda högttemperaturreaktorer (HTGR). Dessa har ett bränsle som tål mycket höga utbränningar. Vissa experter anser att använt bränsle från en HTGR är en mycket stabilare avfallsform än använt bränsle från en lättvattenreaktor. Vidare har HTGR väsentligt högre verkningsgrad och ger således mindre mängd använt bränsle per producerad kilowattimme el. Det finns således skäl att bevaka utvecklingen inom dessa områden.

Inom området upparbetning och separation är huvudinsatserna internationellt allttjämt koncentrerade på vattenbaserade system, även om pyrokemiska processer anses viktiga för vissa typer av bränslen med höga halter av americium och curium. Tills vidare bör de svenska arbetena, liksom tidigare fokuseras på de vattenbaserade systemen. Andra system bevakas översiktligt.

För svensk del är det viktigt att följa den internationella utvecklingen och upprätthålla en rimlig kompetens inom landet, åtminstone så länge som en stor del av elförbrukningen produceras med kärnenergi. Kompetens som utvecklas genom forskning om avancerade kärnbränslecykler och kärnavfallsstrategier är värdefull och användbar också för utveckling av säkerhet, bränsleförsörjning och avfallshantering för existerande lättvattenreaktorer. Den är också betydelsefull för att kunna bedöma den framtida utvecklingen av kärnavfallsprogrammet.

Forskningsinsatserna bör i första hand riktas mot att ta fram kunskaper som har betydelse för säkerhet, genomförbarhet och tillförlitlighet. Material och bränsle är i detta sammanhang centrala ämnen. Det är också viktigt att öka kunskapen om de processer som kan komma att ingå i framtida avancerade kärnbränslecykler så att man kan identifiera och beskriva de olika typer av radioaktivt avfall som kan uppkomma.

Omfattningen på SKB:s insatser har under de senaste fem åren varit av storleken fem miljoner kronor per år. Inom EU sker en viss ökning och breddning av arbetet på framtida avancerade system som kan ha betydelse för utvecklingen av separation och transmutation. Uppföljning av dessa arbeten kräver något ökade resurser och i vissa fall fördjupade studier. En ökning av SKB:s insatser är därför motiverad under den kommande perioden. För perioden 2008–2010 beräknas en årlig budget på mellan sex och sju miljoner kronor.

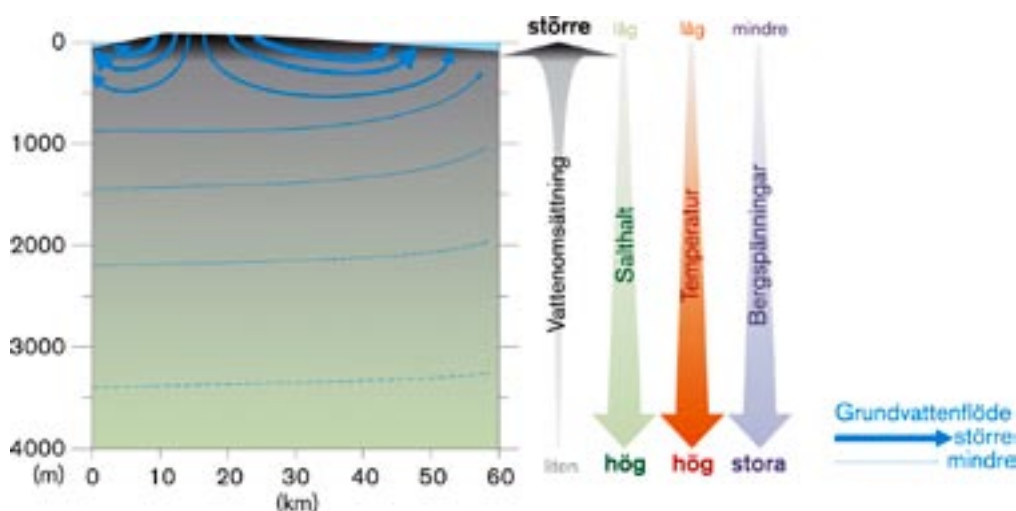
28.2 Djupa borrhål

Vid förvarsmetoden deponering i djupa borrhål är det berget som är den viktigaste barriären för att isolera avfallet och förhindra att radioaktiva ämnen sprids till biosfären. Konceptet bygger på antagandet att grundvattenförhållandena är mycket stabila på stora djup. Anledningen till de stabila förhållandena är att grundvattnet har hög salthalt (och därmed också hög densitet) och därför ogärna blandar sig med det ovanpåliggande lättare sötvattnet. Figur 28-1 visar hur egenskaper som vattenomsättning, salthalt, temperatur och bergspänningar förändras med djupet. Juhlin et al. /28-16/ har föreslagit en konceptuell modell för de översta fem kilometrarna av berggrunden i Sverige, se figur 28-2. De eventuella grundvattenrörelser som sker tros inte ha någon kontakt med markytan. Därmed skulle heller inte några radioaktiva ämnen kunna föras upp till ytan med grundvattnets hjälp.

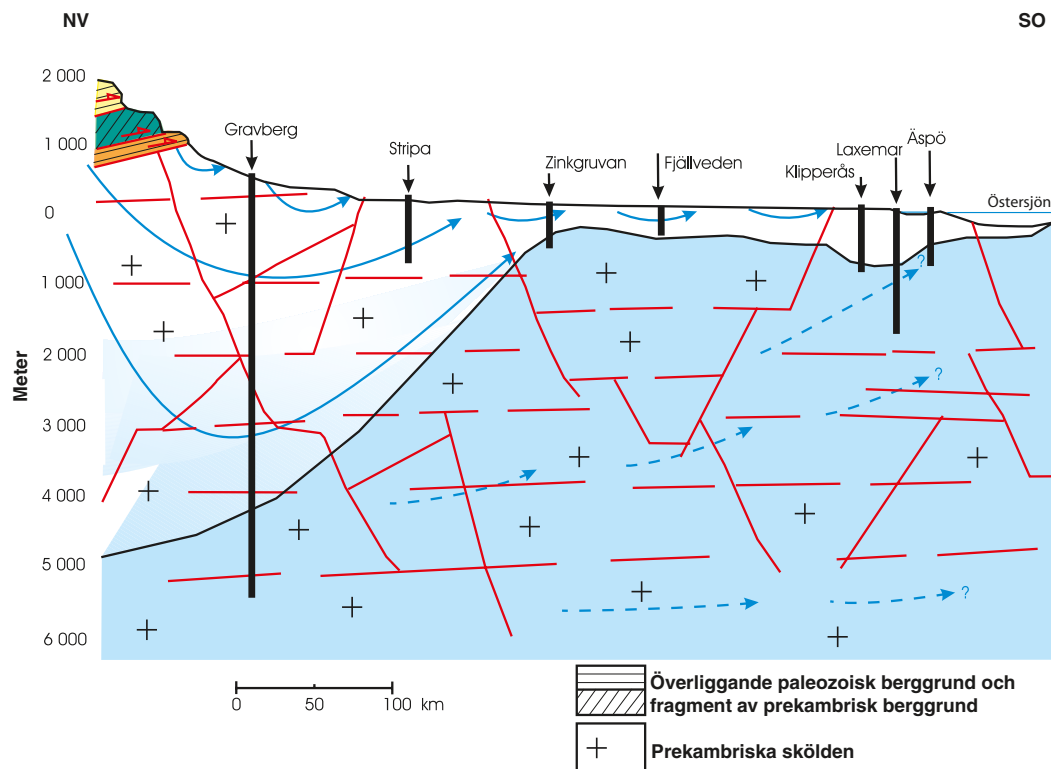
Den långsiktiga säkerheten i djupa borrhål bygger således på bergets funktion. Det finns emellertid andra barriärer. Kapseln ska konstrueras för att motstå de mekaniska påfrestningar som uppstår på fyra kilometers djup. Buffertens främsta uppgift är att fixera kapslarna i sina lägen efter deponeringen. Den höga salthalten och den höga temperaturen gör emellertid den kemiska miljön mycket aggressiv. Dessutom medför svårigheten att effektivt kontrollera deponeringen att initiala kapselskador inte kan uteslutas. Vi kan därför inte räkna med någon långsiktig säkerhetsfunktion hos kapseln eller bufferten.

Att lokalisera ett område för deponering i djupa borrhål är förenat med större osäkerheter än motsvarande lokalisering av ett KBS-3-förvar. Emellertid är principen densamma: utifrån berggrundskartor väljs en lämplig plats. Lämpligheten måste bekräftas med borrhningar. Skillnaden är att KBS-3-förvaret lättare kan anpassas till berggrunden, bland annat genom möjligheten till okulär besiktning av deponeringshålen. Deponeringshålen i ett sådant förvar kan redan från början borras på lämpliga positioner, och hål som visar sig olämpliga kan förkastas. I ett djupt borrhål måste förhållandena som helhet antingen accepteras eller förkastas. Möjligen skulle deponering kunna ske i begränsade delar av hålet. Vidare kan kunskapen om omgivande bergvolym aldrig bli lika bra med konceptet djupa borrhål som med KBS-3.

I dagsläget finns teknik för att borra djupa borrhål. Den behöver emellertid utvecklas för att klara den grova dimension som det är fråga om. Utrustning för deponering finns inte, inte heller de åtgärder som kommer att behövas för strålskärning eller för att återta kapslar.



Figur 28-1. Översikt över hur den svenska berggrundens egenskaper förändras med djupet.



Figur 28-2. Vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil genom Sverige.

28.2.1 Tidigare utredningar om djupa borrhål

Parallellt med KBS-3-metoden har SKB under 20 års tid utrett andra metoder för geologisk deponering. I FoU-program 86 /28-17/ och i FoU-program 89 /28-18/ ingick bland annat studier av hur ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle kunde utformas.

Under början av 1990-talet bedrevs studierna av alternativa utformningar i ett gemensamt projekt – Pass – Projekt alternativstudier för slutförvar /28-19/. De tre alternativa geologiska slutförvaringsmetoder som undersöktes i Pass-projektet var djupa borrhål, medellånga hål (senare kallat KBS-3H) och långa tunnlar. Alla dessa metoder jämfördes med vertikal deponering enligt KBS-3-metoden med avseende på teknik, långsiktig funktion och säkerhet respektive kostnader. Av de tre alternativa metoderna bedömdes medellånga hål ha störst potential, se tabell 28-1. Djupa hål fick den lägsta rangordningen i alla tre deljämförelserna. För såväl teknik som kostnader var resultatet entydigt. I fråga om långsiktig funktion och säkerhet var omdömet mer diskutabelt. Den lägre placeringen berodde främst på att systemets förmåga att isolera det använda kärnbränslet i ett långsiktigt perspektiv främst är knuten till en enda barriär – berget.

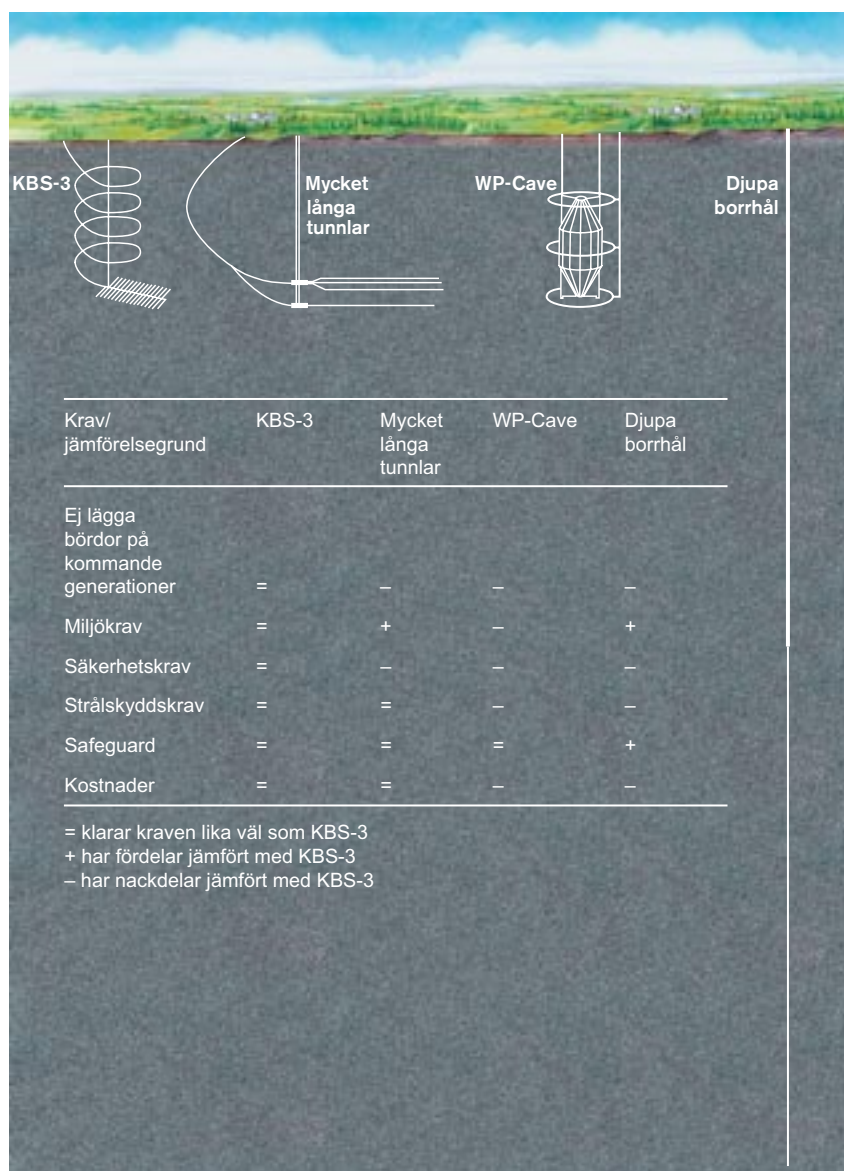
Tabell 28-3. Sammanställning av resultaten från de tre deljämförelserna av förvarssystem i Pass-rapporten /28-19/. Placering 1 är förmånligast.

Geologisk slutförvaringsmetod	Teknik	Långsiktig funktion och säkerhet	Kostnader
KBS-3V	1	1	2
Medellånga hål (KBS-3H)	2	1	1
Långa tunnlar	3	1	2
Djupa borrhål	4	4	4

År 2000 gjorde SKB ytterligare en jämförelse mellan olika metoder för geologisk deponering. KBS-3 jämfördes med mycket långa tunnlar, WP-Cave och djupa borrhål /28-20/. Denna gång utgick värderingen från kraven i lagar och förordningar samt i internationella överenskommelser. Följande jämförelsegrunder beaktades:

- Inte lägga bördor på kommande generationer
- Miljökrav
- Säkerhetskrav
- Strålskyddskrav
- Safeguards
- Kostnader

Även denna gång bedömdes KBS-3 och medellånga hål ha störst potential, se figur 28-3. SKB kunde konstatera att det fanns ett omfattande behov av kunskapsuppbyggnad och teknikutveckling när det gäller djupa hål.



Figur 28-3. SKB:s bedömning av olika metoder för geologisk förvaring.

Omfattningen och innehållet i ett Fud-program, som behövs för att bedöma konceptet djupa borrhål på likvärdiga grunder som KBS-3 /28-21/, undersöktes också. Resultaten från Pass-projektet och en sammanställning av geologiska förhållanden på stora djup /28-22/ låg till grund för programmet. Utredningen behandlade kunskapsläget och behovet av forskning och utveckling inom:

- Geovetenskap
- Borrings- och deponeringsteknik
- Tekniska barriärer
- Säkerhetsanalys

Dessutom redovisade utredningen tidsplaner och kostnader. Resultatet visade att det skulle ta drygt 30 år och kosta minst fyra miljarder kronor att nå samma kunskapsnivå som för KBS-3. De geovetenskapliga insatserna styr programmets totaltid. SKB har inte för avsikt att genomföra programmet på grund av de bedömningar som framhålls i avsnitt 28.2.3.

I anslutning till forsknings- och utvecklingsprogrammet för djupa borrhål lät också SKB det tyska företaget Deutag ge sina synpunkter på de tekniska förutsättningarna för att borra fyra kilometer djupa hål med en diameter av 80 centimeter /28-22/. Slutsatsen av denna rapport är att författaren bedömer att det är möjligt att borra dylika hål, men att detta samtidigt skulle utgöra en av de största utmaningar som borrhågsindustrin stått inför. I studien av borrhågsteknik redovisas även en möjlig teknik för att deponera kapslarna.

28.2.2 Djupa borrhål i andra länder

Inget annat land i världen förordar djupa borrhål som sitt förstahandsalternativ för att ta hand om använt kärnbränsle. Många länder, såsom exempelvis Finland och Frankrike, gör inga studier alls. De genomför därför inget ytterligare arbete på konceptet. Förutom i Sverige har en del arbete inom ämnesområdet gjorts i USA av United States Department of Energy. Man har intresserat sig både för lågtemperaturförvar och för högtemperaturförvar. I de senare packas bränslet så tätt att den avgivna värmen delvis smälter upp berggrunden runt om. I USA har man också intresserat sig för slutförvaring av avfall från kärnvapentillverkning i djupa borrhål.

Den brittiska avfallsorganisationen Nirex publicerade 2004 en studie /28-23/ om hur olika koncept för förvaring i djupa borrhål utvecklats sedan 1970. Slutsatserna i denna rapport var att mycket av det arbete som gjorts i USA i själva verket baserar sig på SKB:s arbete redan inom Pass-projektet. Nirex konstaterar också att slutförvaring i djupa borrhål aldrig har demonstrerats i praktiken och att det troligen skulle kosta ansevärd summor att öka kunskapen till samma nivå som för ytligare typer av geologiska förvar.

Under 2007 genomför Nirex en studie av tekniken för att borra och deponera i djupa borrhål.

28.2.3 Djupa borrhål i det svenska kärnbränsleprogrammet

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Inför Fud-program 2004 genomförde SKB en litteraturstudie för att komplettera tidigare insamlad information om förhållandena djupt nere i jordskorpan /28-24/. Studien omfattade den geovetenskapliga information, som publicerats i den öppna litteraturen efter 1997. Tyngdpunkten lades på borrhågsborring i kristallina bergarter. Litteraturstudien sammanfattade de nyaste resultaten och drog en serie slutsatser om vad detta innebär för deponering i djupa borrhål. När det gäller termiska egenskaper är det svårt att uppskatta temperatur och värmeledningsförmåga på stora djup, särskilt om berggrunden är heterogen. Mycket av informationen tyder på att det råder nära nog stagnanta förhållanden på flera tusen meters djup och att det är de höga saltkoncentrationerna som i hög grad bidrar till detta. Samtidigt finns det observationer som indikerar att snabba transporter av lösningar är möjliga även i miljöer med mycket höga salthalter. Påståenden om att det förekommer flöden och transporter på stora djup kan vara svåra att motbevisa. Förekomsten av bakterier diskuteras också. Temperaturen kommer förmodligen inte att överstiga 115 °C. Därmed skulle bakteriellt liv vara möjligt.

SKI konstaterade att den enda barriär som kan antas fungera för konceptet djupa borrhål är berget, förutsatt att bergarten på förvarsdjup är relativt homogen. Egenskaper på kort och lång sikt hos bentonit och andra buffertmaterial är svåra att bedöma på stora djup. Likaså är det svårt att förutsäga hur länge kapseln förblir tät. Baserat på tillgänglig kunskap kan det redan från deponeringstillfället vara svårt att tillgodogöra sig mer än berget som barriär. I så fall står detta i strid med SKI:s föreskrifter (SKIFS 2002:1) om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne.

SKI:s bedömning från granskningen av Fud-program 1998 kvarstod. Deponering i djupa borrhål är förknippat med så stora osäkerheter att det inte bör betraktas som ett realistiskt alternativ till KBS-3-metoden.

SKI ansåg att det finns goda skäl att förtydliga redovisningen inför slutligt val av metod och inför miljöbalksprövningen. SKI och SSI ansåg båda att en noggrannare jämförelse bör ske med KBS-3-metoden. SKI ansåg att en sådan jämförelse bör ske med en systematik som bygger på samma principer som SKB utvecklat för säkerhetsanalys för andra slutförvar och instämmer med SSI att jämförelsen kan illustreras av förenklade beräkningar.

Kasams bedömning är att djupa borrhål inte är en realistisk metod. Möjligheten att återta det använda kärnbränslet vid en sådan metod torde vara i det närmaste obefintlig och därmed skulle det även bli betydande svårigheter att genomföra en demonstrationsetapp för ett sådant förvar. Kasam anser även att det torde vara svårt att bedöma de termiska förhållandena och de hydrauliska transportförhållandena på så stora djup.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har undersökt möjligheterna att genomföra en säkerhetsbedömning /28-25/ för deponering i djupa borrhål enligt SKI:s och SSI:s önskemål, men kunde konstatera att osäkerheterna är så stora att någon sådan inte är meningsfull. I samband med detta gjordes också en modellstudie av den geologiska barriärens isolerande förmåga /28-26/. Beräkningarna visar att kombinationen värmeutveckling från bränslet – gradient på ytan – sprickzon inte förmår att driva det salta grundvattnet uppåt på ett sådant sätt att det leder till snabba transportvägar. Flödestiderna blir i storleksordningen 1–100 miljoner år, vilket är mycket längre än varaktigheten av värmeavgivningen från kapseln. I studien var framtida glaciationer inte medtagna. Nuvarande dataunderlag kommer från ett mycket begränsat antal djupa borrhål. Berggrunden i dessa är inte representativ för den miljö som ett slutförvar skulle byggas i. De mätningar som har genomförts har gjorts i annat syfte än förvaring av kärnavfall.

Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG) publicerade år 2006 en litteraturstudie om djupa borrhål /28-27/. MKG påpekar i denna rapport att vi inte vet vad som händer med övergången mellan de två typerna av grundvatten under en nedisning. SKB håller med om detta. En inlandsis skulle till exempel kunna medföra att gränsen mellan ytnära och tyngre djupare grundvatten flyttas i vertikalled. Omfattande studier visar entydigt att de största förändringarna över tiden för ett geologiskt förvar sker under glaciala perioder då en inlandsis påverkar platsen /28-28/. Nedisningar ger den största ökningen av grundvattenflödet, samt den största ökningen av hydrostatiskt tryck. De är vidare något man måste räkna med under den tid som krävs av ett förvar för använt kärnbränsle, oavsett vilken metod som används.

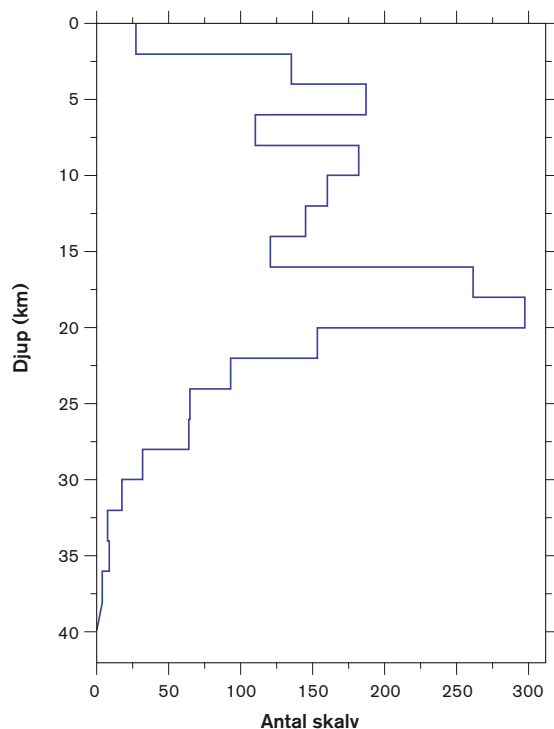
Det är riktigt att ett inlandsisscenario medför risker, i bemärkelsen ökade påfrestningar, för alla typer av slutförvar i Sverige. I dagsläget är det dock inte korrekt att säga att existerande data visar att riskerna minskar ju djupare avfallet placeras i berggrunden, oavsett metod. För att föra ett resonemang kring dessa risker krävs att man gör åtskillnad mellan olika typer av förvarssystem och utvärderar funktionen hos deras barriärsystem som helhet. Avses med risker, risk för utsläpp av radioaktiva ämnen från ett slutförvar är bilden komplex eftersom risken för utsläpp beror av just funktionen av barriärsystemet som helhet. SKB:s bedömning är att man vid tidpunkten för glaciation inte kan tillgodoräkna sig kapselns eller buffertens barriärfunktioner i djupa borrhål på grund av påfrestningar vid deponering, begränsade (om några) möjligheter att kontrollera deponeringen och de kemiska, termiska och mekaniska förhållandena på stora djup. Nuvarande kunskap och existerande data visar att det är osäkert om förvar i djupa borrhål skulle kunna visas vara säkert i samband med glaciation med förväntade förändringar i grundvattenflöde och ökad frekvens av större jordskalv, eftersom man vid dessa tillfällen enbart kan tillgodoräkna sig bergets barriärfunktion.

När inlandsis växer till och smälter av sker även relativt snabba isostatiska förändringar, vilket förändrar spänningsförhållandena i berget, vilket i sin tur också skulle kunna påverka grundvattenflödet. Detta ökar ytterligare osäkerheten kring hur grundvatten på stora djup beter sig i anslutning till nedisningar.

Samma resonemang kan tillämpas på jordskalv, vilket är den andra faktorn som bidrar till den totala riskbilden för ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle /28-27/. Jordskalv i Sverige initieras ofta på djup omkring 5–25 kilometer. Figur 28-4 visar djupfördelning av alla jordskalv registrerade av det Svenska Nationella Seismiska Nätet (SNSN) mellan augusti 2000 och januari 2007, totalt 2 081 skalv. Under icke-glaciala förhållanden sker mellan fem till sex gånger fler skalv på ett djup på 2,5–6 kilometer än på djup grundare än 2,5 kilometer. Med andra ord sker det betydligt fler skalv på de djup som är aktuella för djupa borrhål än på de djup som är aktuella för ett KBS-3-förvar.

I anslutning till att inlandsisar kommer och går kan man förvänta sig en tydligt ökad frekvens av jordskalv /28-29, 28-30, 28-31/. Det är sannolikt att djupfördelningen hos glaciala skalv, med avseende på den ”tysta zonen” (få skalv i de översta 1–2 kilometrarna och många skalv i den undre seismogena zonen), är lik fördelningen i figur 28-4 /28-32/. Spänningarna i den översta delen av skorpan är generellt lägre än de som krävs för skalv. Detsamma bör gälla under glaciala förhållanden (även om man räknar med tillskottet från glacialt indicerade böjspänningar).

Skalv med låg magnitud påverkar mindre områden i bergrunden än skalv med hög magnitud. I detta sammanhang bör man kunna bedöma effekten av skalv mindre än magnitud tre som liten. De flesta av skalven i figur 28-4 är av låg magnitud, mindre än tre. I samband med en glaciation förväntar man sig dock betydligt fler skalv av magnitud tre och uppåt än vad som är fallet för observationerna i figur 28-4 /28-32/. Som nämnts ovan förväntas dessa större skalv oftast ske på djup större än 1–2 kilometer. Det bör betyda att ett förvar på ett djup enligt konceptet djupa borrhål, som ligger närmare startpunkten för de flesta skalven, är mer utsatt för jordskalv än ett grundare KBS-3-förvar. Detta skulle gälla både under icke-glaciala förhållanden och framför allt i anslutning till glaciationer då skalven är fler.



Figur 28-4. Djupfördelning av alla jordskalv registrerade av det Svenska Nationella Seismiska Nätet (SNSN) mellan augusti 2000 och januari 2007 (2 081 skalv). Djupbestämningarna är gjorda i SNSN:s rutinanalys, vilket innebär att resultaten är preliminära. Dock förväntas inga stora förändringar i djupfördelningen för de översta 5–7 km vid kommande förbättrade analyser. Data framtagna vid Institutionen för geovetenskaper (geofysik) vid Uppsala universitet.

I samband med jordskalv sker volymetriska förändringar av berggrunden på grund av kompression och töjning av bergmassan och de spricksystem den innehåller. Observationer från bland annat Island visar att man vid dessa tillfällen kan få en tydlig mobilisering av grundvattnet /28-33/. Teoretiskt bör det även gälla salina grundvatten på stora djup. Oavsett vilket djup man skulle välja för ett förvar enligt konceptet djupa borrhål (2–5 kilometer) så kommer ett sådant förvar att kunna påverkas av glaciala jordskalv. Detta är särskilt ogynnsamt, eftersom de tekniska barriärerna i konceptet djupa borrhål kan vara förbrukade på grund av den svårkontrollerade deponeringen och den aggressiva miljön på de aktuella djupen. Glaciala skalv skulle därför teoretiskt kunna medföra att radionuklider transporteras mellan förvaret och det yttligare mer strömmande grundvattnet eller mellan förvaret och markytan.

Konceptet djupa borrhål har på senare tid diskuterats flitigt dels inom ramen för samråden inför kommande tillståndsansökningar, dels i samband med ett seminarium i det genomlysningssprojekt som Kasam bedriver.

Program

SKB:s bedömning från Fud-program 2001 och 2004 kvarstår. Ingenting talar för att deponering i djupa borrhål skulle kunna öka säkerheten eller minska kostnaderna för det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet. Principiella svagheter, såsom att konceptet baseras på en svårkontrollerbar deponering, en enda barriär efter en kort tid och stora osäkerheter om förvarets utveckling under framför allt en istid kvarstår.

Motiv för SKB:s bedömning kommer att avrapporteras senast i samband med ansökningstillfället för slutförvarssystemet i en översiktlig jämförelse mellan KBS-3-metoden och djupa borrhål i vilken de båda metoderna följs genom hela kedjan, det vill säga inklusive:

- förutsättningar för lokalisering samt karakterisering och val av förlägningsplats,
- borrhåstekniken i dag och dess utvecklingsmöjligheter,
- förutsättningar för uppförande, drift och förslutning,
- kärnteknisk säkerhet vid hantering av inkapslat använt kärnbränsle,
- fysiskt skydd och kärnämneskontroll,
- långsiktig säkerhet för ett förslutet förvar.

SKB kommer att fortsätta följa utvecklingen inom ämnesområdet djupa borrhål. Motiv saknas däremot för att genomföra något forskningsprogram för djupa borrhål. Resurserna bör i stället koncentreras på att realisera ett slutförvar enligt KBS-3-metoden.

Del V

Samhällsvetenskaplig forskning

- 29 Översikt – samhällsvetenskaplig forskning
- 30 Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter
- 31 Beslutsprocesser
- 32 Opinion och attityder – psykosociala effekter
- 33 Omvärldsförändringar

29 Översikt – samhällsvetenskaplig forskning

Till ansökningarna om att få bygga inkapslingsanläggningen respektive slutförvaret för använt kärnbränsle ska bifogas en miljökonsekvensbeskrivning – ett MKB-dokument. Detta ska innehålla beskrivningar av vilken påverkan och vilka effekter planerade anläggningar och verksamheter får. MKB-dokumentet ska även innehålla beskrivningar av bedömda konsekvenser för människa och miljö. Eftersom kärnbränsleprogrammet även ska hanteras inom ramen för det demokratiska systemet, lokalt och nationellt, vill SKB också kunna presentera ett underlag som behandlar viktiga samhällsaspekter, framför allt för beslutsfattare och allmänhet. Därför bedriver och finansierar SKB forskning inom det samhällsvetenskapliga området.

Statens råd för kärnavfallsfrågor, Kasam, uppmärksammade tidigt behovet av en kvalificerad samhällsvetenskaplig forskning inom kärnavfallsområdet. Det skedde bland annat i samband med Kasams granskning av Fud-program 2001. Behovet av ökad kunskap om kärnavfallsfrågans samhälls- och demokratiaspekter har också framförts av de berörda kommunerna. De särskilda krav som ställs på verksamheter som medför konsekvenser långt in i framtiden är ett område som Kasam ägnat betydande kraft. Kasam gav uttryck för detta redan i sin kunskapslägesrapport 1998 /29-1/. Kraven gäller inte bara tekniken, utan även frågor om tillförlitlighet, förtroende och uthållighet under föränderliga yttre villkor. Hur ska stabiliserande faktorer i form av institutioner, överföring av kunskap, värderingar och ansvar från generation till generation kunna främjas?

Kasam har genomfört en rad seminarier med medverkan av forskare och beslutsfattare och då tagit upp frågor om demokrati, beslutsfattande i komplexa frågor och, inte minst, etiska aspekter. Ett flertal publikationer som berör dessa centrala frågeställningar har tagits fram av Kasam och bidragit till ett förbättrat kunskapsläge /29-2 till 29-5/. Hösten 2006 anordnades till exempel ett seminarium om regelsystemet och olika aktörers roll under beslutsprocessen /29-2/. Kasam har, med sin breda kompetens, stora möjligheter att även fortsättningsvis verka för att samhällsfrågorna behandlas på ett kvalificerat sätt inom forskningen.

Under de åtta förstudier som SKB genomförde 1993–2000 ägnades samhällsaspekterna ett betydande intresse. I förstudierrapporterna /29-6 till 29-13/ finns beskrivningar och analyser av befolkningsutveckling, näringsliv, psykosociala aspekter, arbetsmarknad, kommunens verksamhet och ekonomi, kommunikationer, turism, fastighetspriser med mera. Rapporterna innehåller prognoser och bedömningar av utvecklingen i kommunen och regionen, både med och utan en etablering av ett slutförvar. SKB (och även andra) har under förstudierna även publicerat en rad andra rapporter som berör samhällsvetenskap, till exempel /29-14 till 29-16/.

Som ett förberedande arbete inför uppbyggnaden av ett program för samhällsvetenskaplig forskning kartlade SKB under 2003 merparten av den svenska forskning som har anknytning till avfallsfrågan samt den viktigaste internationella forskningen. Kartläggningen har sammanställts i en allmänt tillgänglig sökbar databas på 400 poster. Två förberedande forskningsseminarier genomfördes under 2002 och 2003, där forskare och kommuner fick komma med synpunkter på programmets upplägg och innehåll.

Syftet med den samhällsvetenskapliga forskningen som SKB stödjer är att:

- Bredda perspektivet på kärnbränsleprogrammets samhällsaspekter. Därmed underlättas möjligheterna att utvärdera och bedöma programmet i ett större sammanhang.
- Ge djupare kunskap och bättre underlag för plats- och projektanknutna utredningar och analyser. Därmed utnyttjas kunskap och resultat från samhällsforskningen till att höja kvaliteten på olika beslutsunderlag.
- Bidra med underlag och analyser till forskning, som rör samhällsaspekter av stora industri- och infrastrukturprojekt. Därmed kan kärnbränsleprogrammets erfarenheter tas tillvara för andra likartade projekt.

I det förberedande arbetet utkristalliserade sig fyra generella forskningsområden som relevanta för avfallsfrågan och kommunerna:

- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter.
- Beslutsprocesser.
- Opinion och attityder – psykosociala effekter.
- Omvärldsförändringar.

Huvudinriktningen för de forskningsområden som SKB stödjer ska vara mot tillämpad forskning men det kan även finnas gränssnitt mot grundforskning. De olika forskningsområdena presenteras närmare i kapitel 30 till 33. Nedan beskrivs slutsatser, nyvunnen kunskap och program på en mer övergripande nivå.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI konstaterade att SKB har hört sammat önskemålen från ett flertal remissinstanser att även inkludera samhällsvetenskaplig forskning i sitt Fud-program. Oskarshamns kommun anser bland annat att det program som etablerades 2004 innehåller relevanta områden och har en vällovlig bredd. Några av remissinstanserna ville dock att SKB ska klargöra hur relationen mellan samhällsforskning, tillståndsansökningarna, MKB-dokument och utredningar ser ut. SKI efterfrågade en tydligare redovisning av hur processen kring programuppbyggnad, utlysning, urval, kriterier och granskning har utformats och genomförts. Kasam och miljörörelsen efterlyste en forskning som är fristående från SKB.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2004

Relationen mellan forskning och övriga dokument

Ett antal remissinstanser, bland annat Östhammars kommun, vill att SKB ska klargöra hur relationen mellan samhällsforskning, tillståndsansökningarna, MKB-dokument och utredningsverksamheten ser ut.

MKB-dokumentet ska beskriva hur den tilltänkta verksamheten kan påverka människa och miljö. Syftet med forskningsprogrammet är bland annat att ge underlag för en bred politisk och social belysning samt för prövningen av slutförvaret. Målgruppen är framför allt beslutsfattare lokalt och nationellt.

Jämfört med de samhällsutredningar som genomförs är samhällsforskningen inte i första hand kommunspezifisk, utan syftar till att ta fram ny och generell kunskap. En utredning styrs utifrån en tydlig beställning där uppdragsgivaren formulerar frågeställningarna medan forskning präglas av en förutsättningslös prövning och en hög grad av självständighet när det gäller att formulera forskningsfrågor, välja metodik och att dra slutsatser utifrån erhållna resultat. Till forskningsuppgifterna rekryteras de mest lämpade forskarna vid universitet och högskolor medan utredningar om lokala förhållanden förutsätter, förutom expert- och sakområdeskunskap, att även lokal kunskap tillförs.

Forskning och utredningar skiljer sig även när det gäller granskningsförfarandet. Forskningen genomgår sedvanlig akademisk granskning och granskas även, via Fud-program, av beredningsgruppen och vid öppna seminarier. När det gäller utredningar sker granskningen av beställaren SKB och berörda kommuner. Forskning och utredningar arbetar med andra ord utifrån olika förutsättningar. Genom att båda ofta behandlar samma ämnesområden är det i vissa fall fruktbart med en ömsesidig kunskaps- och erfarenhetsöverföring, men detta är inte ett ändamål i sig.

Remissinstansernas frågor om hur resultaten ska komma kommunerna, myndigheterna och SKB:s program till del kan besvaras med att resultaten regelbundet redovisas vid öppna seminarier, genom publicering av artiklar i forskningsprogrammets årsbok och projektens slutrapporter samt genom informationsförmedling via SKB:s webbplats.

Arbetsformer

SKI vill att SKB tydligare ska beskriva hur processen kring programuppbyggnad, utlysning, urval, kriterier och granskning har utformats och genomförts.

Samhällsforskningsprogrammet inleddes 2004 och har byggts upp successivt. Genom en stegvis uppbyggnad kan synpunkter från samrådsparterna och remissinstanserna, i samband med deras granskning av Fud, komma att påverka programmets innehåll. Programmet är öppet för att nya frågeställningar kan aktualiseras under de närmaste åren.

Utllysning

En första inbjudan att komma in med idéskisser inom de fyra övergripande forskningsområdena skickades våren 2004 ut till ett antal högskolor och universitet. Åtta forskningsprojekt prioriterades i denna första ansökningsomgång. Kompletterande utlysningar genomfördes sedan under år 2005 och 2006. Inbjudan skickades vid dessa tillfällen till samtliga universitet i Sverige. Forskarna uppmanades vid de senare ansökningsomgångarna att särskilt uppmärksamma projekt som ger ny kunskap om dagens användning av media i relation till framtidsfrågor, demokrati och riskuppfattningar. Studier om ungdomars syn på teknik och demokrati, ungdomars uppfattning om risk och säkerhet i förhållande till nya teknologier och möjligheter att påverka sin omvärld och framtid efterfrågades också. Samhälleliga institutioners och intresseorganisationers etiska bedömningar och prioriteringar i relation till lokaliseringen av ett slutförvar var ytterligare frågeställningar som särskilt skulle belysas. Utlysningarna resulterade i att fyra nya projekt beviljades medel.

Forskningsprogrammet har hittills engagerat forskare från universiteten i Lund, Göteborg, Örebro, Linköping, Stockholm, Uppsala, Umeå samt högskolan i Halmstad, vilket får ses som en god geografisk spridning. Programmet har även en god ämnesmässig bredd och omfattar discipliner som ekonomisk historia, kulturgeografi, juridik, psykologi, sociologi, humanekologi, medievetenskap, religionsvetenskap, teknik- och vetenskapshistoria, samhällsvetenskap, ekonomi och etik. De flesta projekten i programmet är tvååriga. Skälet är att samrådsparterna löpande ska kunna ta del av resultat från forskningen och att skapa utrymme för kompletteringar av programmet genom nya projekt.

Forskningskommunikation

Beslutsfattare och övriga intressenter ska ges möjlighet att ta del av resultat från forskningsprogrammet. I forskningsuppgiften ingår därför även att kommunicera delresultat och slutresultat till olika målgrupper genom seminarier och att, förutom den vetenskapliga publiceringen, även publicera sina forskningsresultat i en mer populärvetenskaplig form, till exempel i samhällsforskningens årsbok /29-17, 29-18/. Information om och resultat från samhällsforskningsprogrammet sprids också via SKB:s webbplats. Via dessa kanaler kan kommuner, allmänhet, myndigheter och miljöorganisationer och forskare följa utvecklingen av projekten.

Tre forskningsseminarier har genomförts under år 2004, 2005 och 2006 i syfte att presentera resultat från den pågående forskningen. Seminarierna är en viktig mötesplats för en direkt dialog mellan forskare och övriga intressenter. Nästa seminarium i denna serie äger rum i november 2007.

En avstämning av programmet påbörjades i slutet av år 2006. Intervjuer har genomförts med representanter för kommuner, myndigheter, forskare och miljörelsen. Intervjupersonerna ombads komma med synpunkter på det hittillsvarande programmet och att ge förslag på nya forskningsprojekt som bör genomföras under de närmaste åren.

Beredningsgruppen

En särskild beredningsgrupp har utsetts för att stödja programmets innehåll och utveckling. Den ska svara för att forskningsprojekten har den vetenskapliga kvalitet och relevans som krävs, och att uppdragen riktas till de forskare eller forskargrupper som är lämpliga för uppgiften. Beredningsgruppen består av forskare inom samhälls- och beteendevetenskap. Till gruppens uppgift hör också att regelbundet följa utvecklingen av arbetet. Projekten lämnar halvårsvisa rapporter av verksamheten som kommenteras av gruppen.

En viktig uppgift för beredningsgruppen är att granska artiklar till SKB:s årsbok /29-17, 29-18/ samt de slutrapporter /29-19 till 29-26/ som publiceras inom programmet. Granskning sker även vid öppna seminarier. Detta arbete innebär inte en vetenskaplig styrning av forskningen utan syftar till att uppnå ökad klarhet och relevans i artiklar och rapporter. De forskare som engagerats för olika forskningsuppgifter formulerar själva sina forskningsfrågor och ansvarar för metodik, resultat och slutsatser. En tydlig roll- och uppgiftsfördelning i kombination med en väl fungerande forskningskommunikation skapar förutsättningar för en fristående forskning. De arbetsformer som har etablerats för samhällsforskningsprogrammet syftar till att åstadkomma detta.

Program

Våren 2007 gjordes en fjärde utlysning med ledning av de synpunkter på programmet som inkommit från kommuner, myndigheter och övriga remissinstanser. I denna ansökansomgång efterfrågades i första hand tvärvetenskapliga forskningsprojekt som studerar olika aspekter av den kommande beslutsprocessen. Exempelvis juridiska, etiska, ekonomiska, demokratiska och organisatoriska aspekter, men även att forskningen ska kunna belysa konsekvenser av fördelningen av beslutsmandat, vinster, risker och kunskap – lokalt och centralt. Utlysningen innebär att ytterligare steg har tagits för att utveckla samhällsforskningsprogrammet.

Nedanstående tre nya forskningsprojekt prioriterades bland de idéskisser som inkom efter programmet fjärde utlysning våren 2007.

- ”Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg i ett rättsligt perspektiv”, Göteborgs universitet.
- ”Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan”, Kungliga Tekniska Högskolan.
- ”Bilderna av platsen – om riskuppfattning och beslutslegitimitet”, Umeå universitet.

SKB avser även under år 2008 och 2009 att finansiera samhällsforskning. Eftersom samhällsforskningen ska bidra till att bredda bland annat kommunernas beslutsunderlag kan nya och kompletterande frågeställningar komma att aktualiseras under den beslutsprocess som följer efter SKB:s tillståndsansökningar. Det är dock SKB:s ambition att forskningsprogrammet redan före år 2010 innehållsmässigt ska svara upp mot de behov som finns av att få olika samhällsaspekter belysta. Den återkommande dialog som sker under programmets gång ökar möjligheterna för detta.

30 Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter

Syftet med forskningen inom området socioekonomisk påverkan är att öka kunskapen om förståelsen för hur enskilda orters ekonomi och befolkningssammansättning påverkas av att en ny och stor anläggning etableras på orten. Denna kunskap kan i sin tur lämna viktiga bidrag till SKB:s, berörda kommuners och andra intressenters bedömningar av hur etableringen av slutförvaret kan komma att påverka ortens ekonomi och befolkningsutveckling.

Med socioekonomisk påverkan avses både snävt ekonomiska aspekter, som sysselsättning, industri-etablering, företagaranda, fastighetspriser, kommunal ekonomi och turism samt samhällsekonomiska effekter som resande till och från orten, in- och utflyttning till eller från orten liksom ortens renommé och attraktionskraft.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Det fanns inte några konkreta granskningssynpunkter på själva forskningsområdet. SKI påpekade dock att forskningsresultaten i allmänhet bör vara tillämpliga för intressenterna i pågående och framtida samrådsprocesser.

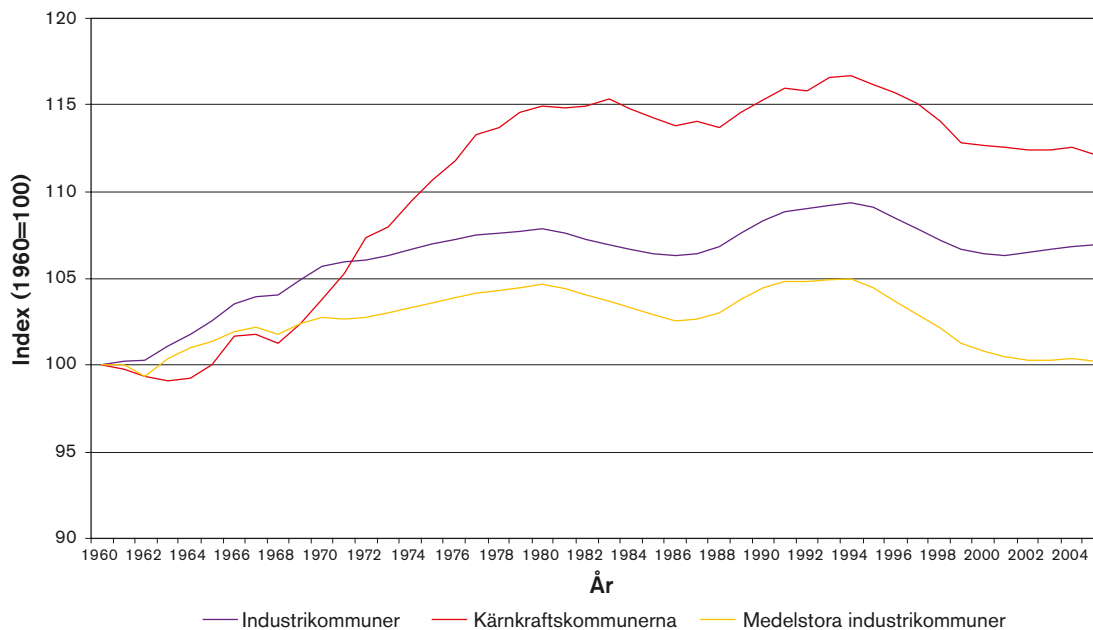
Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

Forskningsområdet svarar väl mot SKI:s önskemål om tillämplighet i det pågående arbetet. Resultaten visar på vilket sätt de berörda kommunerna kan komma att påverkas av de planerade investeringarna. Två forskningsprojekt har genomförts inom området. Projekten är ”Lokal utveckling och regional mobilisering kring tekniska och storskaliga projekt” och ”Långsiktiga socioekonomiska effekter på små och medelstora orter”. Slutrapporter från dessa projekt publicerades under hösten 2006 och våren 2007 /30-1, 30-2/.

Lokal utveckling och regional mobilisering kring tekniska och storskaliga projekt

Syftet med denna studie var att undersöka de långsiktiga lokala socioekonomiska effekterna av en kärnkraftsinvestering genom att, i ett ekonomisk historiskt perspektiv, studera förändringar i befolkningsutveckling och näringsstruktur i två kärnkraftskommuner och några referenskommuner under en period av cirka 50 år. Resultatet av denna utveckling jämfördes sedan med övriga industrikommuner i Sverige.

Ett resultat är att kärnkraften skapade en bestående befolkningsökning i de två kommunerna, se figur 30-1. Även om den snabba befolkningstillväxten klingade av relativt snabbt och kärnkrafts-orterna tenderade att återgå till tidigare utvecklingsmönster, stabiliserades dock befolkningstalen på högre nivåer än vad som varit fallet utan kärnkraftsetableringarna. Detta faktum pekar på att kärnkraften gav länkeffekter in i den lokala ekonomin och kan ha orsakat en strukturförändring, som långsiktigt förändrat orternas socioekonomiska struktur. Kärnkraftskommunerna klarade sig bättre än referenskommunerna och övriga industrikommuner under 1970- och 1980-talet. Med ekonomisk-historiska jämförelser som utgångspunkt för diskussionen blir slutsatsen att en investering i ett slutförvar kommer att få effekter på lokalplanet, men att det i slutändan inte räcker för att i sig driva den socioekonomiska utvecklingen framåt. Även om det är de lokala socioekonomiska effekterna som studeras i projektet kan man inte bortse från att kärnkraftsetableringarna också har betydelse för den nationella ekonomin. Faktorer kring den politiska beslutsprocessen och samhällsdebatten kring kärnkraften kan också ha påverkat det lokala ekonomiska utfallet.



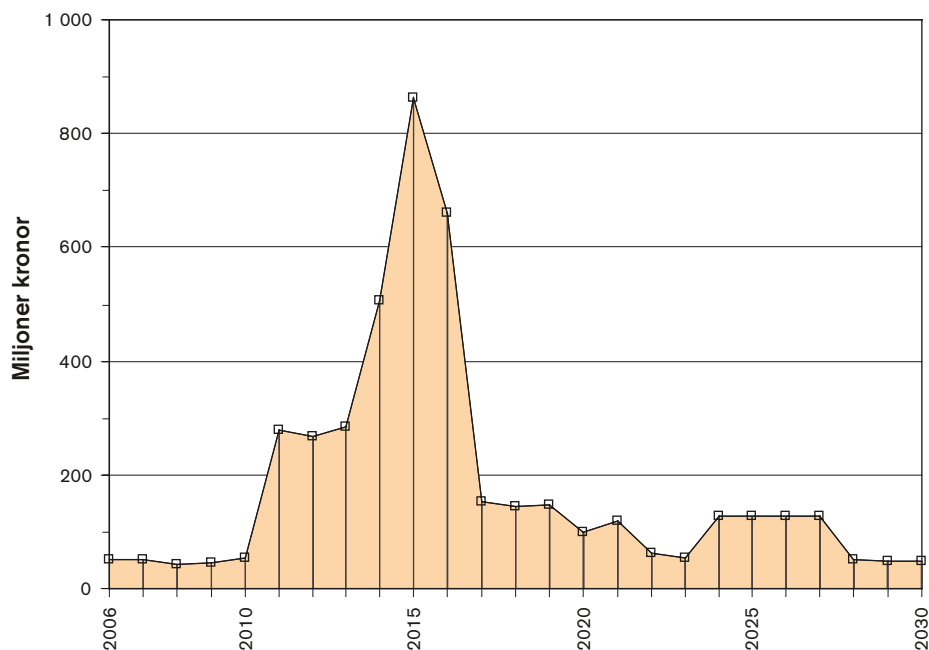
Figur 30-1. Befolkningsförändringstakt i kärnkraftskommunerna Oskarshamn och Östhammar, medelstora industrikommuner samt industrikommuner som helhet 1960–2006.

Långsiktiga socioekonomiska effekter på små och medelstora orter

I denna studie ställs frågan om vilka lokala spridningseffekter ett slutförvar för använt kärnbränsle kan komma att få. För närvarande pågår platsundersökningar i Östhammar och Oskarshamn och slutförvaret kommer sannolikt att byggas i någon av dessa kommuner. Slutförvarsinvesteringen består av ett flertal olika investeringar – slutförvar, utbyggnad av SFR, nybygge av en inkapslingsanläggning och en fabrik för montering av kapslar. Figur 30-2 visar upphandlingsbehovet för slutförvarsinvesteringen över tid. Lokaliseringsförutsättningarna skiljer sig åt. Utbyggnaden av SFR måste ske i Östhammar då SFR redan finns där. Inkapslingsanläggningen bör enligt SKB byggas i anslutning till Clab som är förlagt till Oskarshamn. Dessa omständigheter betyder att delar av den totala investeringssumman för slutförvarssystemet – cirka 15 miljarder kronor – redan nu går att knyta till specifika platser. Fabriken för montering av kapslar är dock inte platsbunden på samma sätt.

Resultaten från en enkätundersökning, som gjorts i anslutning till studien, visar att näringslivet i de två kommunerna skiljer sig åt med avseende på möjligheter att leverera varor och tjänster till slutförvarsinvesteringen. Vid en jämförelse mellan leverantörskapacitet och upphandlingsbehov förefaller det som om att det lokala näringslivet i Oskarshamn har en sammansättning som bättre matchar slutförvarsinvesteringens behov. De lokala spridningseffekterna av slutförvarsinvesteringen begränsas emellertid inte till de aktiviteter som härrör till byggandet av anläggningarna. Drift- och efterarbeten vid anläggningarna ger också inkomster och sysselsättning.

Slutförvaret med sidoinvesteringar kommer att generera spridningseffekter i både Östhammar och Oskarshamn, oavsett i vilken kommun slutförvaret lokaliseras. Däremot blir de ekonomiska spridningseffekterna olika på grund av skillnader i det lokala näringslivets leverantörskapacitet och de förutbestämda lokaliseringarna av vissa sidoinvesteringar. Analyserna visar bland annat att de lokala spridningseffekterna blir tämligen stora i Oskarshamn om Östhammar får slutförvaret, medan effekterna i Östhammar blir ytterst begränsade om slutförvaret placeras i Oskarshamn, se tabell 30-1. Notera dock att lokaliseringen av kapselfabriken och tillverkningen av kopparkapslarna inte är begränsad till Oskarshamns och Östhammars kommuner. I tabell 30-1 antas kapselfabriken ligga i samma kommun som slutförvaret.



Figur 30-2. Upphandlingsbehov för slutförvarsinvesteringen över tid.

Program

Forskningsprojektet ”Långsiktiga socioekonomiska effekter av stora investeringar på små och medelstora orter” har resulterat i en uppföljning av forskningsresultaten genom den upphandlingsutredning som genomförs i Oskarshamn och Östhammar under 2006–2007. Detta är ett exempel på de kopplingar som kan finnas mellan forskningen och utredningsverksamheten och ska ses som ett mervärde som faller ut av programmet, men är inte ett syfte i sig.

Tabell 30-1. Alternativa geografiska kostnadsfördelningar för slutförvarsinvesteringen.

Investering	Kostnad (miljoner kronor)	Alternativ 1: Oskarshamn får slutförvaret		Alternativ 2: Östhammar får slutförvaret	
		Oskarshamn	Östhammar	Östhammar	Oskarshamn
Bygga	Slutförvar	3 860		3 860	
	Inkapslingsanläggning	2 280			2 280
	Kapsel-fabrik	200		200	
	Utbyggnad av SFR	445		445	
Drift och rivning	Slutförvar	3 300		3 300	
	Kapsel-fabrik	3 550		3 550	
	Inkapslingsanläggning	1 960			1 960
	TOTALT	15 595	15 150	445	11 355

31 Beslutsprocesser

Lokaliseringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kontroversiell fråga, bland annat därför att det är en komplicerad verksamhet och att tidsperspektivet är svårt att överblicka och förstå. Frågan har kopplingar till både lokal samhällsplanering, nationell energipolitik och utvecklingen internationellt. Genom att ta fasta på politiska frågor av denna speciella karaktär är syftet med forskningen att lägga grunden för en generell kunskap om beslutsprocesser kring komplexa frågor. Denna kunskap kan i sin tur lämna väsentliga bidrag till att genomföra samråd, utredningar, planeringsinsatser och beslutsfattande. Såväl SKB som berörda kommuner och andra intressenter, till exempel kommuninvånarna, får därmed nytta av forskningen. Hur beslutsprocessen kring en slutförvarsetablering faktiskt ser ut är en sak och hur den uppfattas är delvis en annan. Det finns en lång rad svenska och utländska studier av beslutsprocesser att dra lärdom av, till exempel i vad mån fattade beslut uppfattas som legitima, rättvisa och effektiva.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Det fanns inte några specifika granskningssynpunkter på själva forskningsområdet.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Två projekt har inletts inom området. En slutrapport från projektet "Allmänhet, expertis och deliberation" publicerades hösten 2006 /31-1/. Slutrapporten från det andra projektet "Resurs eller avfall - internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle" publiceras under hösten 2007.

Allmänhet, expertis och deliberation

Syftet med studien var att bidra med kunskap om relationen mellan expertis och en bredare allmänhet i deltagandeprocesser som berör komplexa vetenskapliga och tekniska frågor. Det specifika fall som studeras är den svenska samrådsprocessen om ett slutförvar för använt kärnavfall.

Frågor som ställs är: Hur avgränsas och definieras allmänheten och vilka metoder används för detta? Vilka arenor för medborgardialog skapas och vilka institutionella förutsättningar för deltagande innebär dessa? Finns mekanismer som stödjer respektive motverkar en förhandling om expertisens gränser? Hur förhåller sig aktörer som deltar i samrådsaktiviteter till expertis? Hur diskuteras lokala och gränsöverskridande miljökonsekvenser i samråd? Studien använder sig av kvalitativ fallstudiemetodik. Det empiriska materialet är observation, formella och informella intervjuer samt dokumentstudier.

Slutsatser som dras av forskarna är att det sätt som samråden organiseras på ger ett särskilt fokus på kommunerna, lokalbefolkningen och lokala miljöfrågor. Förändringar som gjorts under processens gång har dock inte ändrat de institutionella förutsättningarna för deltagandet på samrådets arenor. SKB:s lokala informations- och kommunikationsverksamhet leder till goda relationer, men motverkar inte verksamhetsutövarens dominerande roll relativt övriga parter. Regionala och allmänna samrådsmötena skiljer sig åt med avseende på vilka som deltar och på det sätt SKB:s starka ställning balanseras.

Processen rymmer mekanismer som både stödjer och motverkar diskussioner och förhandlingar om expertisens gränser. En motverkande mekanism är när deltagare förhåller sig till MKB som ett rättsligt verktyg och gör hänvisningar till lagtolkningar som stöder den egna ståndpunkten. Expertisens gränser utmanas genom synpunkter som rör de långa tidsaspekter som är involverade i slutförvarsfrågan.

Resurs eller avfall – internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle

Projektet påbörjades hösten 2005 och slutrapporteras hösten 2007. Genom jämförande studier av ett antal länder ska projektet belysa i vilken mån och på vilket sätt olika samhällsdimensioner påverkar politiska beslutsprocesser och teknopolitiska förändringsprocesser. Dimensionerna kan beskrivas i form av ett antal frågor som ställs för varje land som studerats. Producerar landet kärnvapen? Har landet en expansiv eller stagnerande kärnkraftssektor? Har landet stark eller svag kärnteknikkompetens? Har landet stark eller svag antikärnkraftsfrörelse? Har landet erfarenhet av kärnkraftsolyckor? I vilken utsträckning har landet tillgång till inhemska urantillgångar? Har landet goda geologiska förutsättningar för ett slutförvar? Är landet en demokrati eller diktatur? Prägla landets politik av en stark eller svag lokal politisk makt? Prägla landet av en stark eller svag nationell identitet? De länder som studeras är Finland, Tyskland, Ryssland och Japan. Projektet följer processen från tiden för kärnkraftsetableringen fram till hur kärnkraftsfrågan hanteras i dag.

Program

Ett nytt projekt inom området beslutsprocesser, "Bildens av platsen – riskuppfattning och beslutslegitimitet" startar i slutet av 2007. Planering och åtgärder för att reducera risker och förebygga eller minska effekterna av framtida kriser måste ske på både samhällsnivå och individnivå. Det är därför viktigt med en fungerande kommunikation mellan planerare och beslutsfattare på statlig, regional och kommunal nivå och de enskilda medborgarna. För att denna kommunikation ska fungera måste beslutsfattarna ha kunskap om hur människor uppfattar risker och hot av olika slag.

Flernivåstyrning, eller så kallad multi-level governance, fokuserar på relationen mellan de olika aktörer som är aktiva i en beslutsprocess från lokal nivå upp till internationell nivå. Ett flernivåstyrningsperspektiv visar ofta att beslutsfattande sker inom nätverk som består av både privata och samhälleliga aktörer, samtidigt som det inte gynnar någon enskild nivå. Denna utgångspunkt är också lämplig för att utvärdera olika aktörers roll i en beslutsprocess och vilken legitimitet aktörerna har i en situation med överlappande auktoriteter. I det sammanhanget kan det också vara relevant att studera frågan om vilken legitimitet olika aktörer ger beslutsprocessens övriga aktörer inklusive den egna organisationen och hur de anser att rollfördelningen bör vara. Flernivåstyrningsproblematiken är också lämplig för att undersöka acceptansen för en process och de demokratiska metoder som används.

Studien handlar om hur beslutsprocessen som helhet uppfattas framför allt på kommunal och regional nivå. Mer specifikt belyses följande forskningsfrågor:

- Vad upplever avnämarna är den existerande kontexten av risk, och den avvägning som bör ske mellan miljöhänsyn, upplevda risker och andra samhällseffekter, samt den roll olika grupper bör ha i processen?
- Vad är det formella beslutsmandatet på olika nivåer, hur uppfattas detta av avnämarna och vilka potentiella brister och möjligheter kan finnas?

32 Opinion och attityder – psykosociala effekter

Opinioner och attityder är föränderliga fenomen och präglas av olika drivkrafter liksom av personliga egenskaper. Som fenomen är de därför komplexa att utforska. Etableringen av ett slutförvar är dessutom en tidsmässigt utdragen process, med olika aktörer under olika skeden. Syftet med forskningsområdet är att studera hur opinioner och attityder uppkommer och förändras. Denna kunskap kan lämna viktiga bidrag till förståelsen för de olika aktörernas ställningstaganden och till genomförandet av samråd. Opinioner och attityder är inte bara en spegling av beslutsfattande, faktiska händelser och kommunicerade budskap. Individuella egenskaper och verklighetsuppfattningar spelar också roll. Djupt liggande värderingar och normer, identifikation, upplevda rädslor och oro för risker samt egenintresse är några exempel på faktorer som också har betydelse. Det är därför också betydelsefullt att belysa ”symboliken” kring slutförvaret och dess verksamhet.

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

Granskningssynpunkter på forskningsområdet har framförts av Oskarshamns kommun, som påpekar att även medias behandling av kärnavfallsfrågan bör studeras. Kommunen ansåg också att skillnader mellan mäns och kvinnors attityder är ett annat viktigt perspektiv som inte heller är tillräckligt belyst.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Tre forskningsprojekt har genomförts inom forskningsområdet. ”Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågan” /32-1/, ”Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle”/32-2/ samt ”Kärnavfallet – från energireserv till kvittblivningsproblem” /32-3/. Slutrapporter från dessa projekt publicerades hösten 2006.

Ett nytt projekt som behandlar massmedias hantering av kärnavfallsfrågan ”Som natt och dag men samma kärnas ursprung” startade vid årsskiftet 2005–2006. Projektet ligger i linje med Oskarshamn kommuns synpunkter i granskningen av Fud-program 2004 om att programmet borde kompletteras med forskning om medias behandling av kärnavfallsfrågan. Slutrapporten publicerades under våren 2007 /32-4/.

Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågan

Projektet har studerat de underliggande tankestrukturer som rör begreppen tid och rum i den pågående diskussionen om ett slutförvar i Östhammar och Oskarshamn. Detta har gjorts utifrån ett humanekologiskt perspektiv och fokuserar på de kulturella aspekterna i relationen mellan människa och natur. Genom huvudsakligen metafor-, argumentations- och diskursanalys har de föreställningar som präglar debatter och texter, liksom informanternas egna formuleringar, studerats. Ett för forskarna förvånande resultat är den stora enhetligheten i materialet, men några tydliga skiljelinjer finns dock. När det gäller tidsbegreppet uppfattas tiden fram till dess att beslut fattas om att lokalisera ett slutförvar som överskådlig. Själva anläggningstiden uppfattas som överblickbar medan den långa ”slutförvarstiden” ses som oöverskådlig. Människor tycks i detta sammanhang laborera med två olika sorters tid – ”samhällstid” och ”slutförvarstid”. Beroende på vilket typ av tid som dominerar tänkandet, resonerar man på olika sätt när det gäller ansvaret för kommande generationer och när det gäller slutförvarsfrågan. När det handlar om den rumsliga dimensionen finns en dominerande optimistisk inställning till slutförvaret både i Östhammars och i Oskarshamns kommun. Intervjupersonerna hävdade att ett slutförvar skulle ge bygden en livgivande injektion i socioekonomiska termer. De fåtaliga skeptikerna ifrågasatte både de socioekonomiska värdena och hela lokaliseringsprocessen. I Oskarshamn bedrivs mycket av arbetet med kärnavfallsfrågan inom LKO, Lokal Kompetensuppbyggnad i Oskarshamn – projekt kärnavfall. LKO efterlyser ett lokalt motstånd men detta har man, genom sitt arbetssätt, inkorporerat. Avslutningsvis kan sägas att både de tid- och rumsrelaterade tankefigurerna bygger på föreställningen om ett stabilt nu, som man förlitar sig på ska fungera också i framtiden, samtidigt som det finns en stor osäkerhet om att så verkligen är fallet.

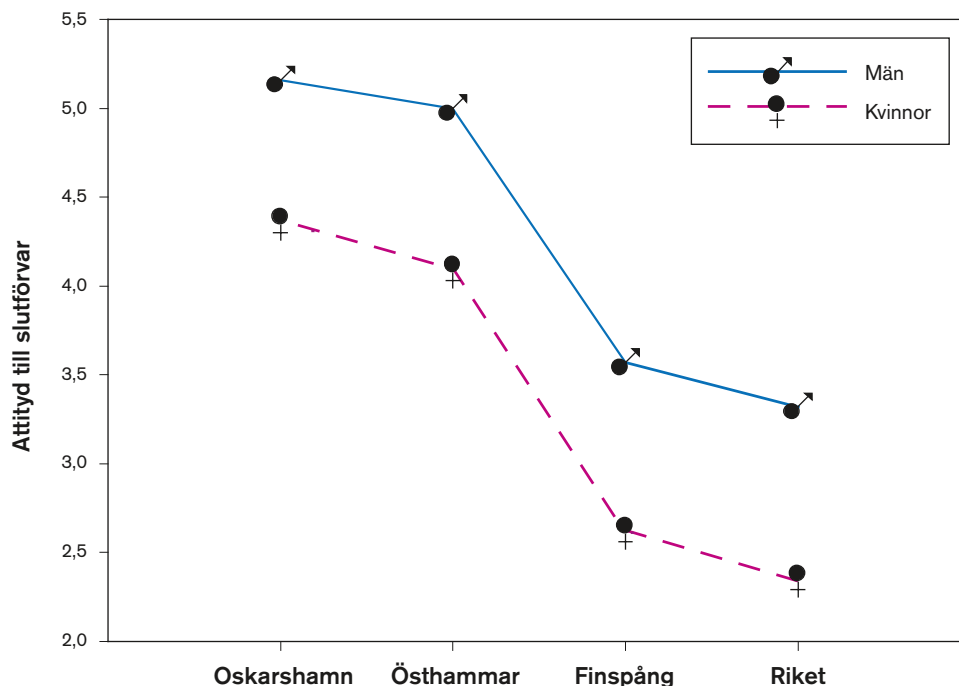
Opinion och attityder till ett förvar för använt kärnbränsle

Attityder och riskuppfattningar avseende ett slutförvar för använt kärnbränsle har studerats i Östhammar och Oskarshamn, i kontrollkommunen Finspång och i riket som helhet, se figur 32-1. Data har insamlats via en omfattande postenkät. Av resultaten framgår att det finns stora skillnader i attityder. Inställning till ett slutförvar är mer positiv i Oskarshamn och Östhammar jämfört med i Finspång och i riket. Riskerna med kärnavfall bedömdes som små i de två förstnämnda kommunerna. I Oskarshamn och Östhammar finns en klar majoritet för ett slutförvar bland männen, medan det bland kvinnorna finns en viss tveksamhet, se figur 32-2. Dessa skillnader kan bara till en mindre del förklaras av att respondenterna har ett kärntekniskt relaterat arbete eller att de har en positiv inställning till kärnkraften. I Oskarshamn och Östhammar är inställningen mest positiv i de yngre åldersgrupperna. Social tillit har en viss, men begränsad, betydelse medan tillit till vetenskapen är viktigare. ”Nimby-attityder”, det vill säga att man är positiv till kärnkraft men negativ till ett slutförvar i den egna kommunen, svarar bara för en mindre del av de negativa attityderna. I en slutlig analys av variationerna mellan kommunerna och riket är den absolut viktigaste förklaringsvariabeln den nytta en sådan anläggning skulle ha för kommunen.

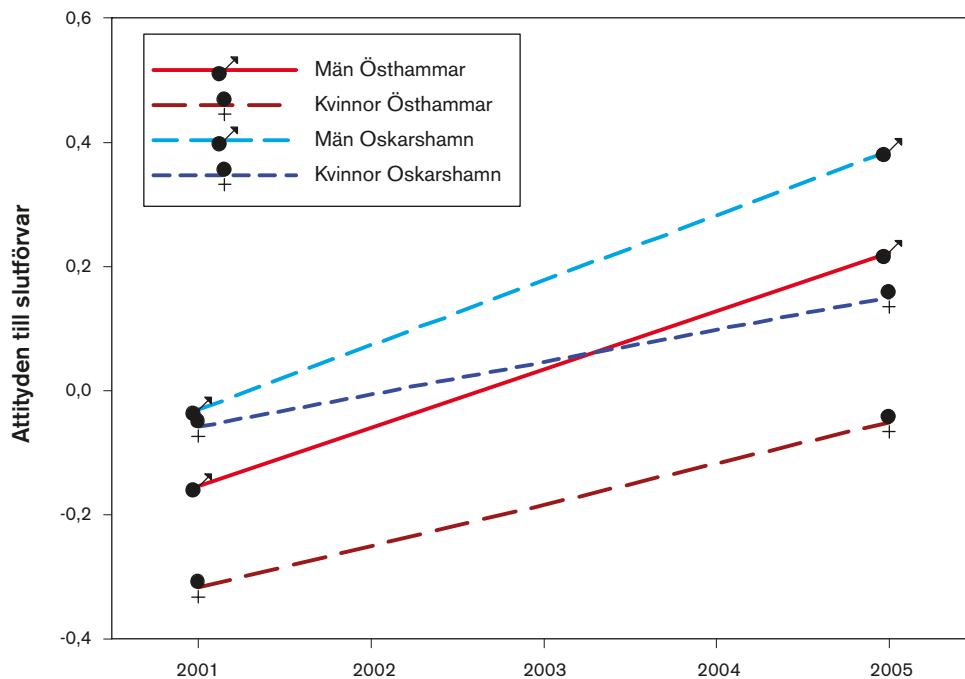
Kärnavfallet – från energireserv till kvittblivningsproblem

Vilka risker är förenade med hantering av högaktivt kärnavfall? Var ska det förvaras? Vem bör ha ansvaret för att det förvaras säkert? Hur ska ett säkert slutförvar utformas? Kan det överhuvudtaget finnas någon lösning som är säker för all framtid? Hur kan vi i så fall veta det? Dessa frågor har ägnats stort utrymme i det offentliga samtalet i Sverige allt sedan planerna på ett svenskt kärnkraftsprogram vann gehör i riksdagen på 1950-talet. Om frågorna i stort sett varit de samma, har i stället svaren varierat desto mer. Såväl kraftindustrins representanter som miljörelsens företrädare har förändrat sina förhållningssätt och sanningsanspråk i takt med att de tekniska, politiska, ekonomiska, vetenskapliga och kulturella omständigheterna har förändrats.

Studien skildrar förskjutningar i värderingsmönster när det gäller hanteringen av det använda kärnbränslet. På 1950-talet såg man kärnavfallet som en energiresurs i framtidens brytare. Denna inställning står i skarp kontrast till 1970-talets konfliktfyllda debatter om huruvida det överhuvudtaget var möjligt att på ett säkert sätt omhänderta det använda kärnbränslet. I studien belyses också meningsmotsättningarna kring slutförvarets lokalisering under 1980- och 1990-talet. En analys görs även av de divergerande uppfattningar om risker, ansvar, kunskap, teknik, vetenskap och natur som fanns i den offentliga debatten.



Figur 32-1. Attityden till ett slutförvar i den egna kommunen.



Figur 32-2. Attityd till slutförvar 2001–2005. Standardiserad skala.

Som natt och dag trots samma kärnas ursprung

Projektets syfte är att kvantitativt och kvalitativt analysera likheter och olikheter i den mediala opinionsbildningen kring kärnavfallsfrågan på riks- och lokalplanet från platsundersökningarnas inledning fram till i dag. Avsikten är också att ge en översikt och att fördjupa förståelsen kring mediernas effekter och demokratiska roll i beslutsprocessen. Tidningar och TV-nyheter i nationella, regionala och lokala medier har undersökts i studien. Totalt har 1 118 artiklar och 77 TV-inslag från femton olika massmedier analyserats. Kvantitativ innehållsanalys är den metod som tillämpats för att ta reda på vad som tagits upp i medierna, dels vem eller vilka aktörer som deltagit och hur den journalistiska bevakningen och mediedebatten fördelat sig över tiden.

Resultaten visar att det finns både likheter och olikheter i den mediala opinionsbildningen. Journalistikens uttryck har varierat, såväl innehållsligt som över tid. Störst var bevakningen i början av år 2002 i samband med att Östhammar, Tierp och Oskarshamn tog ställning till ett fortsatt deltagande i processen. Påfallande få exempel på undersökande journalistik kan identifieras i materialet. Bildanvändningen i de olika medierna visar på stora likheter. ”Platsundersökning” och ”SKB” är de vanligaste temana i pressens texter och televisionens nyhetssändningar. Intresset för platsundersökningarna och det lokala arbetet med slutförvarsfrågan är mycket stort i de lokala och regionala medierna men behandlas knappast alls av riksmedierna. Däremot uppmärksammar riksmedierna exempelvis transmutationsteknik som en tänkbar lösning på kärnavfallsfrågan. Detta tema berörs i sin tur mycket sällan i de lokala debatterna.

Program

Resultat från det tidigare nämnda forskningsprojektet ”Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle” visade att det finns betydande skillnader i attityder mellan män och kvinnor och mellan olika åldrar. Oskarshamns kommun har i sitt yttrande till Fud-program 2004 framhållit vikten av att attitydskillnaderna mellan könen ytterligare ska belysas.

Ett nytt projekt om ”Ungdomars syn på demokrati och teknikfrågor” inleddes därför hösten 2006 med syfte att studera attitydskillnader mellan könen och hur dessa interagerar med ålder. Ökad kunskap inom området är intressant mot bakgrund av att dagens ungdomar kommer att bli framtidens beslutfattare. Fördjupade studier av attitydskillnader mellan könen tillför även en viktig demokratisk dimension inför kommande beslutsprocesser. Slutrapporten publiceras våren 2009.

33 Omvärldsförändringar

Etableringen av ett slutförvar är ett unikt projekt med speciella kännemärken. Till slut är det bara en ort i Sverige som blir aktuell. Samtidigt är det en fråga som mycket tydligt hänger samman med förändringar i omvärlden. Syftet med forskningsområdet är att öka kunskapen om relevanta omvärldsfaktorer och omvärldsförändringar. Denna kunskap kan vara värdefull som tillskott till planering, utredningar, samråd och beslutsfattande inför och efter tillståndsansökningarna. Kunskapen kan också vara viktig för den framtida driften av slutförvaret. Den enskilda ortens ekonomiska situation och utveckling beror av en mängd olika omständigheter i omvärlden. Hur ser den framtida svenska stat ut, som ska ta ansvaret för slutförvaret? Lagstiftning, reglering och finansiering liksom landets ekonomiska situation påverkar. En annan viktig omvärldsförändring är Sveriges deltagande i utvecklingen av det europeiska politiska och ekonomiska samarbetet. Hur ser Sveriges relation till EU ut om 30 år? Hur ser EU ut? Vad kommer en framtida fördjupad europeisk integration i allmänhet att innebära för kärnavfallshanteringen och i vilken mån kommer detta att påverka den specifikt svenska hanteringen?

Slutsatser i Fud 2004 och dess granskning

SKI, Kasam och Oskarshamns kommun påpekar att forskningsområdet ”Omvärldsförändringar” borde ha varit mer omfattande och omfattat fler projekt.

Nyvetenskap sedan Fud 2004

Ett centralt projekt inom forskningsområdet ”Omvärldsförändringar” är studien ”Nationell kärnavfallspolitik i en europeisk union”. Slutrapporten publicerades under våren 2007 /33-1/.

Flera remissinstanser ansåg att forskningsområdet ”Omvärldsförändringar” borde ha ägnats mer uppmärksamhet men, som tidigare har nämnts, byggs forskningsprogrammet upp successivt. De projekt som redovisades i Fud-program 2004 var resultatet av en första utlysningssomgång och ska inte ses som de sista forskningsinsatserna inom området ”Omvärldsförändringar”. Erfarenheter från programmet ska återkommande kunna dras av både SKB och omvärlden och idéer till nya forskningsprojekt ska kunna framföras under programmets gång. Några av de projekt som beviljades medel och hänfördes till området ”Opinion och attityder” berör även området ”Omvärldsförändringar”. ”Kärnavfallet – från energireserv till kvittblivningsproblem” är en historisk studie som kan utgöra en bra utgångspunkt för en diskussion om kommande omvärldsförändringar. Det finns således inga absoluta gränslinjer mellan de olika forskningsområdena. Ytterligare två projekt inom området ”Omvärldsförändringar” har startat under 2006.

Nationell kärnavfallspolitik i en europeisk union

Principen om nationellt ansvar har två sidor: Den ena handlar om hur Sverige tar ansvar för det avfall som uppstår i landet när kärnenergi utvinns. Den andra sidan handlar om de rättigheter Sverige anser sig ha att förhindra att använt kärnbränsle från andra länder slutförvaras eller mellanlagras i Sverige. Den sistnämnda aspekten har lagfästs i ett förbud mot slutförvaring och mellanlagring av utländskt kärnbränsle i Sverige. Frågan om hur Sverige ska ta ansvar för det använda kärnbränslet som uppstår inom landet är inte på motsvarande sätt reglerad i lag. På multilateral nivå regleras frågan om ansvarstagande genom icke-spridningsavtalet från 1970 samt den konvention om säkerheten vid hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall som tillkom inom ramen för IAEA år 1997. Icke-spridningsavtalet bekräftar alla staters suveräna rättighet att utveckla en nationell civil kärnkraftsindustri. Inom ramen för denna suveränitet ligger även kompetensen att fatta beslut om utformningen av kärnbränslecykelns slutsteg. Denna suveränitet bekräftar även i IAEA-konventionen. IAEA har dock sedan 1990-talets början initierat studier rörande de rättsliga, politiska och fysiska förutsättningarna för att etablera multinationella anläggningar för mellanlagring eller slutförvaring av använt kärnbränsle.

Inom ramarna för EU är frågan om ansvar för det använda kärnbränslet inte direkt reglerad. Gemensamma lagstiftningsinitiativ från kommissionen avseende metoden för mellanlagring och slutförvaring av använt kärnbränsle har blockerats av medlemsstaterna. Ansvarsfrågans nationella karaktär, som i vissa medlemsstater kommit till uttryck i en lagstiftning som diskriminerar på grundval av nationalitet, står vid en första anblick i strid med tanken om en europeisk integration. Samtidigt ska noteras att det inte förekommer någon bindande gemenskapsrättslig lagstiftning där principen om nationellt ansvar kommer till uttryck, även om den nationella lagstiftningskompetensen på området uttrycks i diverse politiska dokument. Det finns därmed en hypotetisk möjlighet att frågan om medlemsstaternas rätt att upprätthålla en princip om nationellt ansvar kan komma att prövas av EG-domstolen.

Program

Två nya projekt inom forskningsområdet ”Omvärldsförändringar” startade hösten 2006. Det ena projektet är ”Mot aktivism eller ointresse? Svenska ungdomars syn på demokrati och teknik i ett internationellt och longitudinellt perspektiv”. Projektet ska studera legitimitetsaspekter på långsiktiga politiska beslut. Hur har synen på dessa frågor förändrats under de senaste 60 åren och hur ser förändringarna ut i ett långt tidsperspektiv? Data finns från ett representativt urval av befolkningen från ett 80-tal länder från år 1981 till och med 2006. Slutrapport från projektet publiceras våren 2008.

Det andra projektet är ”Etisk argumentation i kärnavfallsfrågan”. Syftet är bland annat att identifiera och formulera de etiska frågor och problem som aktualiserats i samband med slutförvarsfrågan. De etiska aspekterna på kärnavfallsfrågan är ett perspektiv som Kasam på ett vällovt sätt drivit under många år. Detta perspektiv har hittills saknats i samhällsforskningsprogrammet. Slutrapporten kommer enligt planerna att publiceras under 2008.

Ett nytt forskningsprojekt ”Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg” inleds våren 2008. Syftet är att identifiera och problematisera hur nuvarande lagstiftning reglerar olika aktörers ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg. Utgångspunkten är en sammansatt ansvarsbild vilken innefattar olika typer av ansvar – genomförandansvar, ekonomiskt ansvar och kontrollansvar. Dessa typer av ansvar återfinns inom olika funktionellt avgränsade områden – kärnsäkerhetsansvar (inklusive ansvar för icke-spridning), strålskyddsansvar och miljöansvar. Ansvarsfrågorna är även intimt förknippade med fördelningen av äganderätt och förfoganderätt under slutstegets olika delar. Av speciell vikt för studien är den balans mellan offentligt ansvar och producentansvar som etablerats och i vilken utsträckning denna motsvarar den verkliga ägande- och förfoganderättssituationen.

Projektet avser dessutom att ge underlag till en konstruktiv diskussion om behovet av rättsliga reformer som beaktar det demokratiskt rättsstatliga intresset så som förutsebarhet, likhet, insyn, deltagande med mera. Sedan de svenska principerna för ansvarsfördelning fastlades i lag har den verklighet som regelverket är avsett att reglera genomgått omfattande förändringar. Dessa förändringar omfattar kärnenergiindustrins ägandestruktur, teknologisk kunskapsnivå samt utvecklingen av nya säkerhetspolitiska hotbilder. Någon övergripande analys av hur dessa, interna rättsliga och externa samhälleliga, förändringar har påverkat den svenska ansvarsmodellens tydlighet har hittills inte genomförts. Mot denna bakgrund avser projektet även att undersöka om den ansvarsfördelning som etableras i svensk lagstiftning i dag är ändamålsenlig med avseende på de målsättningar som ställts upp i lagstiftningens förarbeten. Kan dessa målsättningar förverkligas med nuvarande reglering eller har de förändringar som skett medfört ett behov av reformer av nuvarande reglering? Utgångspunkten för studien är den svenska nationella lagstiftningen. Denna kommer att relateras till det regionala regelverk som tillkommit inom ramen för EU samt till relevanta multilaterala regelverk vilka framför allt tillkommit inom ramen för IAEA.

Ytterligare ett nytt projekt inom området omvärldsförändringar ”Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan” kommer att inledas vid årsskiftet 2007–2008. Projektet ska resultera i ett antal uppsatser med följande inriktningar:

”Strålning som etiskt problem” presenterar några centrala sätt att tänka om risker och hur riskbegreppet kan tillämpas på strålning. Den probabilistiska riskanalysen med dess förväntad-nytta-modell har en viktig roll, men även andra analysredskap som hämtas från moralfilosofin kommer att presenteras. Avsnittet avslutas med en diskussion om det nya forskningsområdet strålningsetik där

det bland annat framgår att traditionellt strålskydd bygger på tankestrukturer som ligger mycket nära de centrala begreppen inom moralfilosofin.

”Etiken och den avlägsna framtiden” diskuterar en aspekt på kärnavfallet som blivit mycket uppmärksammat. I denna uppsats presenteras de två huvudsakliga perspektiv inom vilka man har diskuterat långsiktiga effekter av det vi gör i dag: ekonomisk diskontering och hållbar utveckling. Jämförelser görs också med andra samhällsfrågor som rör långa tidsperspektiv: bevarande av arter, bevarande av kulturminnen, förbrukning av naturresurser etc.

”Vad säger försiktighetsprincipen?” tar upp vad som kan avses med begreppen försiktighet och försiktighetsprincipen. Ett vanligt argument för långtgående åtgärder inom kärnavfallshanteringen är att vi ska tillämpa försiktighetsprincipen. Men vad är egentligen försiktighetsprincipen, och vilka konsekvenser får den i praktiken? De olika tolkningarna av försiktighetsprincipen diskuteras och illustreras med exempel både från kärnavfallsområdet och andra områden.

”Hur mycket får det kosta” tar upp den kontroversiella frågan om hur mycket det får kosta att rädda ett liv. Ett vanligt synsätt på riskhantering är att den summa vi är beredda att betala för att rädda ett människoliv bör vara densamma oavsett samhälls-/teknikområde. Om man utgick från den principen skulle kärnavfallsförvaret framstå som orimligt överdimensionerat, enligt de riskberäkningar som gjorts. Denna uppsats syftar till att visa att detta synsätt är starkt förenklat och att det ytterst är en samhällelig bedömning som bör stödjas, men inte dikteras, av en kostnad-nytta-analys.

”Vetenskapens begränsningar” handlar om konsten att göra sig så oberoende som möjligt av den mest osäkra informationen. Kontroverserna om kärnavfallet har till stor del handlat om möjligheterna att alls veta vad som kommer att hända i framtiden. Expertomdömen har satts i fråga, och tilltron till möjligheterna att lösa frågorna med hjälp av vetenskap har ibland varit låg. Vi måste trots detta kunna handla, och fatta beslut, utan att vara helt säkra. I denna uppsats argumenteras för att det bästa vi kan göra är att vid varje tidpunkt utgå från den bästa tillgängliga vetenskapen, samtidigt som vi efter bästa förmåga bedömer graden av osäkerhet i den aktuella vetenskapen.

”Ingenjörsmässighet” – inte bara siffror. Ordet ”ingenjör” har på senare år fått en negativ klang, och man föreställer sig ingenjören som oförmögen att ta hänsyn till annat än det som kan uttryckas med siffror. Denna uppsats är delvis ett försvar för ingenjörsmässighet, framför allt inom säkerhetsområdet. Uppsatsen visar med exempel från olika områden hur man använder principer som inneboende säkerhet (inherent safety), säkerhetsfaktorer och multipla säkerhetsbarriärer. Sådana jämförelser kan hjälpa oss att förstå och granska avfallsförvarets konstruktion på ett mera inträngande sätt.

”Ytterst en politisk fråga” sätter in kärnavfallsfrågan i sitt samhällspolitiska sammanhang. Kärnavfallsfrågan är politiskt sett mycket komplicerad, dels på grund av faktorer som behandlats i de tidigare essäerna, dels också på grund av oklarheter om det lokala beslutsfattandet. Vilken legitimitet har staten i frågor med denna långsiktighet? Hur tungt kan lokala intressen få väga? Har samhället några särskilda skyldigheter gentemot befolkningen i det område där avfallsförvaret lokaliseras? Vilken arbetsfördelning bör eftersträvas mellan experter och förtroendevalda i de avgörande besluten? Vilken handlingsfrihet bör vi ge kommande generationer? Har vi en skyldighet att inskränka deras handlingsfrihet, eller ska vi utgå från att de vet sina egna intressen bättre än vi själva? Dessa frågor belyses utifrån modern beslutsteori och politisk filosofi.

Del VI

Loma-programmet och rivningen

- 34 Översikt – Loma-programmet och rivningen
- 35 Låg- och medelaktivt avfall
- 36 Säkerhetsredovisningar
- 37 Forskning
- 38 Strategier för rivning
- 39 Ansvarsfördelning vid rivning
- 40 Teknik för rivning

34 Översikt – Loma-programmet och rivningen

Loma-programmet omfattar allt låg- och medelaktivt avfall som ska slutförvaras i SKB:s anläggningar. De anläggningar som omfattas av Loma-programmet är både SKB:s befintliga och framtida egna anläggningar för slutförvaring av avfall från de svenska kärnkraftverken. Mellanlagring av långlivat låg- och medelaktivt avfall från kärnkraftverken i BFA (bergrum för avfall) ingår också i programmet. Kärnavfallsfonden finansierar slutförvaringen av rivningsavfall och långlivat låg- och medelaktivt avfall. SKB kan även komma att ta hand om radioaktivt avfall från Studsvik, Ågestareaktorn, bränslefabriken i Västerås och Ranstad. Omhändertagandet av avfallet från dessa anläggningar kommer då att finansieras separat. Slutförvaring av driftavfallet från kärnkraftverken finansieras direkt av tillståndshavarna.

Inför avvecklingen och rivningen av kärnkraftverken kommer rivningsstudier att genomföras i syfte att uppskatta kostnader och avfallsmängder, såväl radioaktivt som inaktivt och friklassat material. Studierna baseras på de strategier och tekniker som tas fram i samarbete med kraftverksägarna. SKB ska enbart ta hand om det radioaktiva avfallet, men i studierna kalkylerar SKB volymerna och kostnaderna för allt rivningsavfall.

Under den kommande treårsperioden är de viktigaste milstolparna:

- Färdigställande av en ny säkerhetsredovisning (SAR) för slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1). Säkerhetsredovisningen delges myndigheterna vid årsskiftet 2007/2008.
- Projektering och komplettering av befintligt BFA på Simpevarpshalvön för mellanlagring av hårdkomponenter.
- Licensiering och tillverkning av avfallstransportbehållare (ATB-1T) för medelaktivt långlivat avfall. Underlaget för licensieringen blir klart under 2009. Tillverkningen påbörjas ett år senare.
- Planeringen för en utbyggnad av SFR påbörjas under 2007. Den utbyggda delen av anläggningen ska kunna tas i drift 2020. Undersökningar av berget startar under 2008.

Den närmaste sexårsperioden omfattar också följande milstolpar:

- Driftstart för torr mellanlagring av långlivat avfall från andra kraftverk än Oskarshamn i BFA, tidigast i slutet av 2011. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring.
- Framtagning av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) samt en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) för en ansökan om att bygga ut SFR. Enligt planerna ska ansökan lämnas till myndigheterna 2013.

Planeringen för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) påbörjas efter det att ansökan om att bygga ut SFR har lämnats in. Driftstarten för SFL beräknas tidigast infalla år 2045. Avfallsmängderna till SFL är relativt små och anläggningen kommer att vara den som sist försluts, eftersom den ska ta emot avfall från övriga anläggningar (kärnkraftverken, Clab och inkapslingsanläggningen) fram till och med avveckling och rivning av dessa. Med hänsyn till de små volymer som är aktuella bedömer SKB att det är rimligt att avvakta med utbyggnaden till dess huvuddelen av avfallet finns tillgängligt för deponering.

35 Låg- och medelaktivt avfall

35.1 Avfallets ursprung

Programmet för att ta hand om låg- och medelaktivt avfall, Loma-programmet, omfattar låg- och medelaktivt driftavfall från de svenska kärnkraftverken och liknande avfall från Studsvik. Det driftavfall som är så lågaktivt att kraftbolagen väljer att deponera det i sina egna markförvar ingår inte. Programmet omfattar även framtida rivningsavfall från kärnkraftverken.

Loma-programmet kan även komma att omfatta radioaktivt avfall som uppkommer från verksamheten i Studsvik, Ågestareaktorn, bränslefabriken i Västerås, Ranstad samt avfall från övrig användning av radioaktivt material vid till exempel forskning och utbildning, på sjukhus och i industrin. Detta ligger emellertid utanför SKB:s åtagande gentemot ägarna och kräver att separata avtal tecknas.

Avfallet behandlas och förpackas vid kraftverken och vid Studsvik. Det radioaktiva icke kärntekniska avfallet (IKA) behandlas vid Studsvik och kan efter särskilt avtal vidarebefordras till SKB:s anläggningar.

35.2 Avfallsmängder och avfallstyper

35.2.1 Kortlivat avfall

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall avser i dag avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken. Detta avfall är väl karakteriserat och hanteras rutinmässigt sedan närmare 30 år. Deponering av den del som SKB ansvarar för sker sedan 1988 i slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1). När avvecklingen av kärnkraftverken påbörjas, tillkommer avfall från rivningen. Detta avfall utgörs av samma typer av avfall som uppstår vid drift och underhåll av kärnkraftverken, men har en annan fördelning mellan de olika avfallstyperna. Rivningsavfallet kommer att kunna behandlas, transporteras och deponeras på samma sätt som driftavfallet. Innehållet domineras av metallskrot och betongrester.

Det kortlivade avfallet förpackas i olika typer av behållare inför transporten till slutförvaret, beroende på uppkomstsätt, aktivitets- och strålningsnivå. De typer av behållare som finns i systemet för närvarande är plåtfat, plåtkokill, betongkokill, betongtank samt ISO-container, se figur 35-1. Samtliga behållare – förutom ISO-containern – transporteras i särskilda strålskärnade avfalls-transportbehållare (ATB) till förvaret.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att det är positivt att SKB tagit med det kortlivade avfallet i Fud-redovisningen.

Kasam noterade att det är nödvändigt att ett nationellt system skapas – inte bara för kärnkraftens avfall utan också för avfall från icke kärnteknisk verksamhet (IKA-avfall). SKB är positiva till att ta hand om radioaktivt avfall från icke kärnteknisk verksamhet – mot skäligen ersättning och om det passar in i den ordinarie verksamheten.

Ursprungligen visade prognoserna att cirka 52 000 m³ driftavfall skulle uppkomma till år 2000 och cirka 90 000 m³ till år 2010. Den verkliga mängden avfall som uppkommit hittills är betydligt mindre (drygt 31 000 m³ i slutet av 2006). Detta beror delvis på att nya behandlingsmetoder och avfallsbehållare används. Det avfall som nu produceras är till volymen mindre, men har högre koncentration av radioaktiva ämnen än vad prognoserna ursprungligen utgick ifrån. Dessutom har markförvaring vid flertalet kraftverk blivit möjligt för avfall med mycket lågt aktivitetsinnehåll, se avsnitt 35.2.3. Slutligen har driften gått bättre än vad som ursprungligen antogs. Bland annat har färre bränsleskador inträffat, vilket leder till mindre mängd avfall.

Volymerna av kortlivat låg- och medelaktivt avfall ökar vid större ombyggnader och när kärnkraftverken slutligen rivs. Den enskilt största faktorn som styr de totala mängderna driftavfall är hur länge kärnkraftverken kommer att vara i drift. Forsmark och Ringhals planerar att driva sina reaktorer i 50 år och OKG har beslutat om en drifttid på 60 år. Den ökade drifttiden för reaktorerna



Figur 35-1. Avfallsbehållare för kortlivat avfall. Foto: Bengt O Nordin.

medför att större mängder driftavfall måste slutförvaras. Samtidigt utvecklas avfallshanteringen med allt mer volymbesparande metoder. Trots drifttider upp mot 60 år bedöms avfallsvolymer inte bli större än de som ursprungligen beräknades för 25 års drift.

Programmet för det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet består till största delen av forskning som rör den långsiktiga säkerheten i slutförvaret, samt utveckling inför utbyggnaden och omlicensieringen av SFR till att omfatta såväl drift- som rivningsavfall. Forskningen behandlas i kapitel 37 och utbyggnaden av slutförvaret i avsnitt 35.3.1.

35.2.2 Långlivat avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet består i huvudsak av två kategorier:

- Hårdkomponenter (styrstavar, härdgaller etc) och de interna delar i reaktorn som är kraftigt neutronbestrålnade. Avfallet uppkommer både vid underhåll och vid rivning.
- Långlivat avfall från verksamheter i Studsvik och från sjukvård, forskning och industri. Detta avfall uppkommer successivt och är inte knutet till driften eller avvecklingen av kärnkraftverken.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken mellanlagras i dag antingen i förvaringskassetter i bassängerna i Clab eller i kärnkraftverkens bassänger. I framtiden kommer även torr mellanlagring att bli aktuell för detta avfall, innan slutförvaret för det långlivade avfallet står färdigt.

Det långlivade avfallet från sjukvård, forskning och industri förpackas i kokiller eller fat och mellanlagras tillsammans med Studsviks eget avfall i ett särskilt bergrum i Studsvik, i väntan på att deponeras i slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall.

Volymen långlivat avfall är än så länge relativt liten, men den kommer att öka i samband med pågående och planerade modifieringar av reaktorerna och senare i samband med rivningen av kärnkraftverken, Clab och inkapslingsanläggningen. En förlängd drifttid av kraftverken ger förmodligen även ökade volymer av långlivat avfall som uppkommer vid underhåll och reparation.

SKI påpekade i granskningen av Fud-program 2004 att SKB i nästa Fud-program bör ge en mer detaljerad beskrivning av programmet för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet. Mot bakgrund av SKB:s övriga verksamhet kommer Fud-program 2010 att fokusera på Loma-programmet.

Ett system för att dokumentera det långlivade avfallet har utvecklats av SKB. Systemet benämns Draak (dataregister för aktivt avfall och komponenter) och liknar det som redan finns för SFR-avfall. Draak tar dessutom hänsyn till att dokumentationen sker successivt. Det senare är med anledning av att avfallet i vissa fall lagras som råavfall under en längre tid innan det får sin slutliga form för deponering.

Planeringen för det långlivade avfallet kommer att utvecklas i Fud-program 2010. Mellanlagringen av långlivat avfall behandlas i avsnitt 35.3.2. Arbetet med att ta fram en säkerhetsredovisning och avfallsinventering för slutförvaret för långlivat avfall kommer att göras när ansökan om att bygga ut SFR har lämnats in år 2013.

35.2.3 Mycket lågaktivt avfall

Det mycket lågaktiva driftavfallet deponeras i kärnkraftverkens egna markförvar och behandlas utförligare i avsnitt 35.3.4.

SKB planerar att genomföra en förstudie över möjligheterna att deponera det mycket lågaktiva avfallet från avvecklingen av kärnkraftverken i markförvar. Förstudien kommer att genomföras i det inledande skedet av planeringen för utbyggnaden av SFR.

35.3 Anläggningar för låg- och medelaktivt avfall

SKB:s existerande och planerade framtida anläggningar för låg- och medelaktivt avfall omfattar:

- Slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1).
- Slutförvaret för rivningsavfall (SFR 3), kommer att utgöras av en utbyggnad av SFR 1.
- Anläggning för torr mellanlagring av medelaktivt långlivat avfall, kommer att utgöra en del av BFA.
- Del av Clab för mellanlagring av hårdkomponenter.
- Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL.

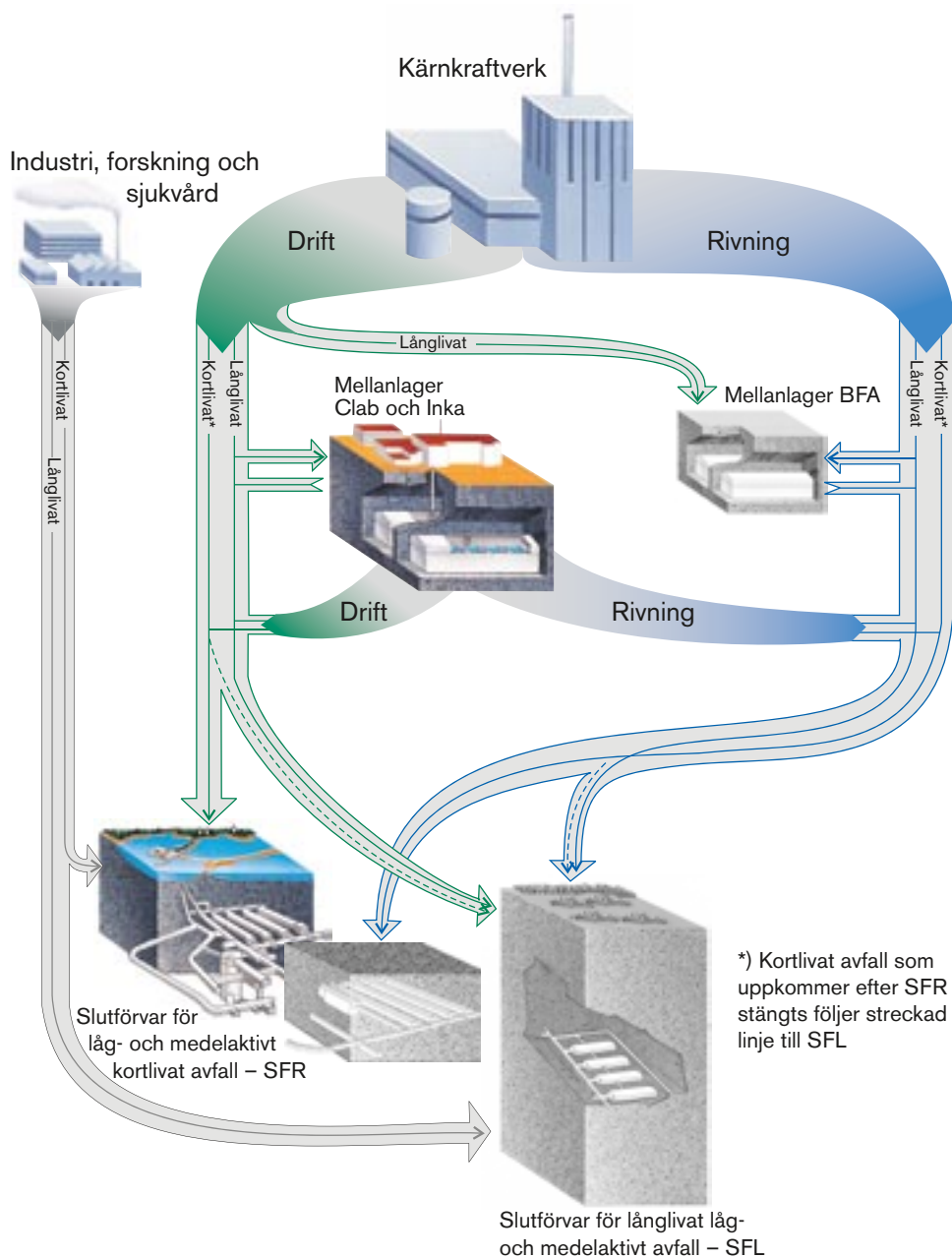
Utöver dessa anläggningar driver SKB ett transportsystem för låg- och medelaktivt avfall (fartyget m/s Sigyn samt avfallstransportbehållare, ATB).

Enlig SKB:s planer kommer det kortlivade avfallet från rivning av kärnkraftverken att deponeras i en utbyggnad av SFR 1, benämnt SFR 3. I samband med denna utbyggnad avser SKB att göra en omlicensiering så att hela SFR-anläggningen kan utnyttjas för att, på ett optimalt sätt, deponera avfall från såväl drift som rivning. Efter omlicensieringen kommer hela anläggningen att benämnas slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall, SFR.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall mellanlagras i dag i Clab, vid kärnkraftverken och i Studsvik. SKB planerar för torr mellanlagring av hårdkomponenter från andra kraftverk än Oskarshamn i det befintliga berggrummet för avfall (BFA) på Simpevarpshalvön som en avlastning av Clab. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring. Mellanlagring av långlivat avfall behövs tills dess att ett slutförvar för detta avfall tas i drift.

Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) planeras stå färdigt för att ta emot avfall tidigast år 2045, det vill säga när större delen av avfallet finns tillgängligt för deponering.

I figur 35-2 nedan visas en schematisk bild av de avfallstyper som uppstår, samt vilken väg de tar till respektive slutförvar.



Figur 35-2. Transportflöden och förvaring av låg- och medelaktivt avfall.

35.3.1 Slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall, SFR

SKI kommenterade i granskningen av Fud-program 2004 att det finns skäl att se över tidsplanerna för slutförvaring av rivningsavfall med tanke på Barsebäck 2, men insåg samtidigt svårigheten att resursmässigt hantera ansökan, projektering och byggande av mer än ett slutförvar. Vidare påpekade SKI att SKB bör utreda hur snart en tillståndsprocess för slutförvaring av rivningsavfall kan påbörjas, om möjligt inom de närmaste åren samt att redovisningen av hur rivningsavfallet ska tas om hand behöver bli mera utförlig. SKB har under 2007 startat ett förprojekt inför utbyggnaden av SFR för att omhänderta och slutförvara rivningsavfall. Tidsplanen för projektet, där licensieringen ingår, redovisas nedan.

SSI påpekade att planeringsförutsättningarna för en utbyggnad av SFR ändras när Barsebäck 2 stängs. Därför bör SKB så snart som möjligt redovisa en ny strategi för utbyggnaden. SKB prioriterar en utbyggnad av SFR för att ta emot rivningsavfallet så snart som möjligt.

Kasam påpekade att SKB bör överväga om planerna på att bygga ut verksamheten vid SFR för rivningsavfall är förenliga med miljöbalken och att SKB bör belysa dessa frågeställningar i Fud-program 2007. En miljökonsekvensbeskrivning kommer att ingå i SKB:s ansökan för utbyggnaden av SFR.

En återkommande helhetsbedömning av SFR-1-anläggningens säkerhet /35-1/ togs fram under 2005 i enlighet med SKIFS 2004:1. Rapportens huvudsyfte var att få en utvärdering av erfarenheterna från driften av SFR 1, såväl tekniskt som organisatoriskt. Erfarenheterna ligger sedan till grund för kommande förbättringar. En viktig generell slutsats i rapporten var att driftperioden kommer att bli betydligt längre än ursprungligen planerat. Trots detta blir den totala avfallsvolymen, då förvaret försluts, mindre än vad de ursprungliga konstruktionsramarna förutsatte. En annan slutsats var att avfallsinventariet har förändrats i jämförelse med det ursprungliga konstruktionsgrundande inventariet och strategier för detta kan behöva utvecklas. Det konstaterades också att personalen som är engagerad i driftarbetet har en gedigen erfarenhet och anläggningskännedom, men att behovet av nyrekrytering och kompetensväxling på sikt måste ges uppmärksamhet.

Forskning har genomförts bland annat i syfte att hitta bättre och säkrare metoder för att uppskatta nuklidinventariet i SFR 1, samt för att analysera den långsiktiga säkerheten hos anläggningen, där de olika barriärerna har en avgörande roll. Forskningen beskrivs mer utförligt i kapitel 37.

Radioaktivt driftavfall

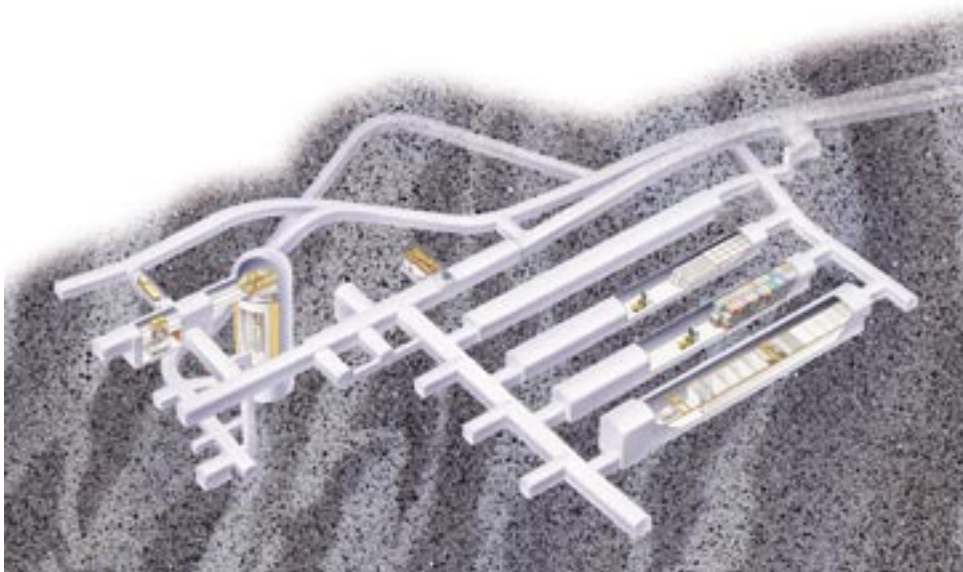
SKB erhöll i juni 1983 regeringens tillstånd att anlägga och driva en anläggning för slutlig förvaring av låg- och medelaktivt avfall. Tillståndet omfattade förvaringsutrymmen med kapacitet att deponera totalt 90 000 m³ förpackat avfall. Denna anläggning benämns SFR 1 och utbyggnaden var avsedd att ske i två etapper, 63 000 m³ respektive 27 000 m³. I den preliminära säkerhetsrapport, som utgjorde underlag till ansökan, redovisades även tänkbara framtida utbyggnader med förvaringsutrymmen för hårdkomponenter (SFR 2) och rivningsavfall (SFR 3). SFR 2 är i dag planeringsmässigt ersatt av slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL). SKB:s ansökan omfattade dock ej dessa framtida anläggningsdelar.

Med anledning av de mindre avfallsvolymer, som förutses i dag, finns inte längre något behov av en utbyggnad av SFR 1 med en andra etapp. Orsaken till att en utbyggnad i två etapper planerades var främst osäkerheter i prognosunderlaget. Den första utbyggnadsetappen dimensionerades för den mängd avfall som enligt prognosen skulle deponeras fram till år 2000. Med prognostiserade avfallsmängder och den transporttakt som planerades motsvarade detta cirka 52 000 m³. Etapp 1 av SFR 1 antogs därmed ge marginal och flexibilitet för den första driftperioden (till och med 2000). Vid slutet av 2006 hade drygt 31 000 m³ av förvarets kapacitet utnyttjats, det vill säga betydligt mindre än vad som ursprungligen prognostiserades. För närvarande prognostiseras att 50 års drifttid för Forsmark och Ringhals, samt 60 år för Oskarshamn kommer att ge cirka 57 000 m³ driftavfall.

Ombyggnader, som till exempel dagens effekthöjningsprojekt och ombyggnader för att förlänga kärnkraftsverkens livslängd, ökar behovet av utrymme för slutförvaring.

Förvaringsutrymmena utgörs i dag av fyra 160 meter långa bergrum i olika utförande och ett 70 meter högt bergrum där en betongsilo byggts, se figur 35-3. I ett av de fyra bergrummen förvaras lågaktivt avfall i vanliga ISO-containerer. Bergrummet kallas BLA (bergrum för lågaktivt avfall). Avfallet i denna del av anläggningen kan hanteras utan någon särskild strålskärning. I tre av bergrummen förvaras avfall som kräver strålskärning, BMA (bergrum för medelaktivt avfall) samt BTF 1 och 2 (betongtankförvar). Betongsilon är avsedd för medelaktivt avfall, främst filter och jonbytarmassor som används vid rening av reaktorvatten.

Ett intressentavtal mellan SKB och ägarna till kärnkraftverken reglerar de volymandelar ägarna har rätt att utnyttja för deponering av driftavfall i SFR 1. Avtalet om andelar är viktigt att upprätthålla för att inget av kraftverken som i dag är i drift ska riskera att drabbas av platsbrist för sitt avfall, vilket i sin tur skulle ge konsekvenser för driften av kraftverken. Det föreligger i dag ingen risk att någon avfallsproducent ska fylla sin volymandel i SFR 1 före utgången av år 2020. Avfallsprognoserna förnyas regelbundet och strategier för deponering och långsiktig planering uppdateras. För de reaktorblock som i dag är i drift har ägarna beslutat om förlängd drifttid. Detta föranleder, tillsammans med tillkommande rivningsavfall, att SFR behöver byggas ut för att utrymmesbrist inte ska uppstå efter år 2020. Planeringen för utbyggnaden beskrivs utförligare nedan.



Figur 35-3. Slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR 1.

Radioaktivt rivningsavfall

SKB bedömer att en utbyggnad av SFR är den bästa lösningen för att ta hand om de mängder kortlivat låg- och medelaktivt avfall, som uppstår vid rivning av kärnkraftverken. I dagsläget saknas tillstånd för att slutförvara rivningsavfall. I samband med utbyggnaden planeras en omlicensiering av hela anläggningen till att omfatta både drift- och rivningsavfall. Avsikten med omlicensieringen är att kunna fördela avfall från drift och rivning på ett optimalt och säkert sätt i anläggningen.

Omfattningen av utbyggnaden av SFR beror på vilka avfallsvolymer som beräknas komma till SFR. Forsmark och Ringhals planerar att driva sina reaktorer i 50 år, och OKG i 60 år. Redan innan alla reaktorer har stängts kommer det att finnas önskemål om deponering av avfall från de tidigare stängda anläggningarna. Den förlängda drifttiden innebär också att en utökning av förvarsdelen BMA behövs. Det är lämpligt att planera för en etappvis utbyggnad av slutförvaret för det kortlivade rivningsavfallet eftersom behov av deponeringsutrymme uppstår vid vitt skilda tidpunkter. Utrymmen för att deponera avfall från de tidigt avställda anläggningarna kommer att byggas ut i etapp 1 av SFR 3. Utrymmen för rivningsavfallet från de block som är i drift i dag kommer att byggas ut i etapp 2.

Storleken på den utbyggda volymen i etapp 1 beror främst på följande faktorer:

- Mängden rivningsavfall som uppstår vid rivning av Barsebäck 1 och Barsebäck 2.
- Ökad mängd driftavfall på grund av förlängd drifttid.
- Behovet av förvaringsutrymme för stora udda komponenter (framför allt från effekthöjningsprojekt).
- Separata avtal kan innebära att även avfall från rivning av till exempel anläggningar i Studsvik behöver beaktas vid utbyggnaden

I etapp 1 kommer en bergsal att byggas av typ BMA medan övriga bergsalar planeras bli av typ BLA.

Planering

Ett förprojekt inför utbyggnaden av SFR har påbörjats under 2007. Platsundersökningar med bergundersökningar kommer att påbörjas under 2008.

Ansökan om en utbyggnad av slutförvaret för reaktoravfall (SFR) kommer att lämnas in till myndigheterna år 2013 enligt nuvarande planering. Ansökan kommer att innehålla en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) samt en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av utbyggnaden. Att erhålla tillstånd enligt ovan bedöms ta minst två år.

Arbetet med utbyggnaden av etapp 1 av SFR beräknas kunna påbörjas under 2016, så att driftstart kan ske år 2020.

Utbyggnaden av etapp 2 ska stå klar för att ta emot rivningsavfall från kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals när de börjar rivras. Tidpunkten för driftstarten av etapp 2 bedöms med hänsyn till planerade drifttider bli omkring år 2030.

En sammanhållen ansökanplan för utbyggnad och drift av SFR kommer att tas fram.

35.3.2 Bergrum för avfall, BFA

SKB och de svenska kärnkraftbolagen anser att ett utrymme för torr mellanlagring av härdkomponenter behövs som komplement eller ersättning till den våta mellanlagringen i Clab. Mellanlagringen i Clab är dyr och utrymmeskrävande och kan på längre sikt orsaka utrymmesbrist i Clab för använt kärnbränsle. Härdkomponenterna är i behov av strålskärning, men inte av kylning. Det beror på att aktivitetsmängden är relativt stor, men att komponenterna inte alstrar värme.

SKB och de svenska kärnkraftbolagen har gemensamt arbetat fram ett förslag på hur härdkomponenter från samtliga svenska kärnkraftverk kan lagras under torra förhållanden. Förslaget innebär att komponenterna skickas till BFA (bergrum för avfall) i Simpevarp som OKG redan i dag utnyttjar för torr mellanlagring.

Drifttillståndet för BFA innehas av OKG medan SKB har en avtalad nyttjanderätt i BFA. För att i framtiden kunna utnyttja BFA för mellanlagring av härdkomponenter från andra kraftverk än OKG krävs en omlicensiering av BFA. Eftersom BFA är OKG:s anläggning så ombesörjer OKG omlicensieringen och uppdateringen av säkerhetsredovisningen. OKG fick nytt tillstånd för sin miljöfarliga verksamhet under 2006 och fick då bland annat tillstånd för att utnyttja BFA som en gemensam lagringsplats för härdkomponenter från kärnkraftsverken i landet. Detta betyder att det från miljösynpunkt är tillåtet att mellanlagra härdkomponenter i BFA. OKG har även skickat in en uppdaterad säkerhetsredovisning (SAR) inklusive säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) för BFA till SKI under 2007. När den godkänts av myndigheten och tillstånd givits kan härdkomponenter från övriga kärnkraftverk också mellanlagras i BFA. SKB kommer även att uppföra en omlastningsstation inne på OKG:s område. I samband med det kommer bygglov samt eventuellt en uppdatering av säkerhetsredovisningen (SAR) att krävas.

Avfall som är lämpligt för mellanlagring enligt den torra metoden finns i dag på samtliga kärnkraftverk. Större mängder tillkommer vid reparationer och ombyggnader av reaktorernas interna delar. I den torra förvaringen ingår tills vidare inte styrstavar och utrustning som innehåller klyvbart material, utan detta lagras även fortsättningsvis i Clab.

Avfallsbehållarna, ställådor (1,3 × 2,3 × 3,3 meter), som härdkomponenterna ska transporteras och mellanlagras i utformas så att de ska kunna överföras till slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall utan ytterligare behandling. Möjlighet till omkonditionering finns dock eftersom kriterierna för deponering ännu inte är fastställda.

Förslaget, att använda sig av torr mellanlagring, innebär att man behöver ta fram en ny avfalls-transportbehållare, ATB-1T, som passar formatet på avfallsbehållarna (ställådor). Projektet för att ta fram avfallstransportbehållare ATB-1T pågår, och är den tidsstyrande faktorn inför idrifttagandet av BFA. Även en ombyggnad av delar av BFA krävs, bland annat kommer en ny travers att installeras. Mellanlagring av härdkomponenter i BFA beräknas kunna starta tidigast i slutet av 2011, då leveransen av ATB-1T är planerad.

Med hänsyn till tidsplanen för driftstart av mellanlagring i BFA samt Forsmarks planer för utbyte av interna delar kommer Forsmark att bygga ett eget mellanlager vilket de kommer att använda till dess att avfallet kan transporteras till BFA.

35.3.3 Slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL

Kraftigt neutronbestrålat långlivat avfall, såsom hårdkomponenter och interna delar från kraftverken, planerar SKB att slutförvara i en anläggning som liknar SFR men är förlagd på ett större djup. Avfallet består dels av komponenter från reaktorhärden, som byts ut under reaktorns drifttid (exempelvis styrstavar, bränsleboxar och detektorsonder), dels konstruktionsdelar från reaktorerna (exempelvis hårdgaller och moderatortankar).

SKI och SSI ansåg i granskningen av Fud-program 2004 att utformningen av ett slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall bör prioriteras och detta bör framgå av nästa Fud-program. SKI uppmanade vidare SKB att i nästa Fud-program ge en väl sammanhållen redovisning, som motiverar vilka konstruktionskrav som måste ställas på förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall utifrån perspektivet långsiktig säkerhet. Exempel på frågor som behöver belysas i större detaljeringsgrad är:

- Val av förvarsdjup.
- Ett eventuellt avstånd mellan slutförvaret för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet och slutförvaret för det använda kärnbränslet.
- Återfyllnadsmaterial och principen med hydraulisk bur.
- Förvarets dimensioner.
- Mängden cement och val av cementtyp.

SKI påpekade att SKB bör redovisa hur det långlivade låg- och medelaktiva avfallet ska hanteras om det uppstår tidigare än planerat och ett "nollalternativ" bör också redovisas. SKB tolkar kommentaren som att myndigheten vill veta vad som händer om SKB:s prognoser inte håller tidsmässigt. Långlivat avfall uppstår redan vid till exempel moderniseringsprojekt och ett "nollalternativ" det vill säga fortsatt hantering på samma sätt som i dag utan åtgärder ingår i projektet att torrlagra hårdkomponenter i BFA.

Planering

SKB kommer att redovisa sina planer för SFL i Fud-program 2010.

Målet är att i Fud-program 2010 kunna redogöra mer detaljerat för hur SKB planerar att projektera slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Redovisningen kan bland annat innehålla strategi för val av plats och förvarsdjup samt studier av förvarets dimensioner.

Beslut om förläggning av slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att fattas om ett par decennier, varför detta fortfarande är en öppen fråga.

I dagsläget planeras för en uppdatering av avfallsinventariet samt en konceptuell säkerhetsbedömning för anläggningen efter det att ansökan om utbyggnad av SFR färdigställts.

35.3.4 Markförvar för mycket lågaktivt avfall

Markförvar finns vid kärnkraftverken i Oskarshamn, Ringhals och Forsmark. Tillståndshavarna för kärnkraftverken är även tillståndshavare och operatörer av markförvaren. Villkoren för deponering fastställs av SSI. En ny ansökan ges inför varje deponeringskampanj. Aktivitetens innehåll i det avfall som är tillåtet att deponera i markförvaren är mycket lågt och i huvudsak kortlivat.

I samband med avvecklingen och rivningen av kärnkraftverken kommer SKB att omhänderta och deponera det radioaktiva avfallet. Konventionellt och friklassat material hanteras av tillståndshavarna. Med dagens planering förutses att allt radioaktivt material deponeras i SFR eller – om det är långlivat – i slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall som SKB planerar bygga. Från Alara- och BAT-synpunkt kan det vara fördelaktigt att deponera svagt radioaktivt material i markförvar liknande dem som i dag finns på kraftverken. En förenklad hantering av det mycket lågaktiva avfallet bör ge lägre dos till den personal, som med dagens planering antingen ska hantera och förpacka materialet så att det passar in i SFR eller dekontaminera materialet till en nivå som gör att det kan friklassas.

Planering

SKB planerar att genomföra en förstudie över möjligheterna att markförvara det mycket lågaktiva avfallet från rivningen av kärnkraftverken. Eftersom detta kommer att påverka SFR genomförs förstudien i det inledande skedet vid planeringen av utbyggnaden av SFR.

35.4 Finansiering

SKB:s verksamhet inom området låg- och medelaktivt avfall finansieras delvis med pengar från Kärnavfallsfonden (slutförvaret för rivningsavfall och slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall) och delvis direkt av delägarna (befintligt förvar för kortlivat driftavfall).

Finansieringen uppdateras årligen och presenteras av SKB i en Plan-rapport /35-2/. Plan-rapporten är bland annat en sammanställning över beräknade kostnader för avvecklingen och rivningen av kärnkraftverken.

Kasam påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att SKB behöver kritiskt granska de beräkningar som hittills har gjorts av kostnaderna för den framtida rivningen. SKB anser att detta är en ständigt pågående process i översynen av Plan-rapporten. Ytterligare underlag till granskning är den rivningsstudie som genomförts och som beskrivs nedan.

SKB har sedan föregående Fud-program genomfört en rivningsstudie för Oskarshamn 3 /35-3/ där bland annat alternativa tekniker, metodik och avfallsmängder redovisas liksom en uppskattning av rivningskostnaderna. Studien utgör referens för alla BWR-block. För övriga BWR-block går det att få fram motsvarande information genom att använda blockspecifika indata i beräkningarna.

Rivningsstudien behandlas utförligare i kapitel 40.

Program

Jämförande studier kommer att göras för samtliga block. Studier av BWR-blocken kommer att baseras på den genomförda referensstudien för Oskarshamn 3. En förnyad studie av rivning av ett av PWR-blocken vid Ringhals kommer att genomföras, på motsvarande sätt som gjorts för Oskarshamn 3, och användas som referens för de övriga PWR-blocken. Läs mer om detta i kapitel 40.

36 Säkerhetsredovisningar

De säkerhetsredovisningar som genomförs i Loma-programmet avser såväl befintliga anläggningar som framtida utbyggnader och nya anläggningar för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall.

I Fud-program 2004 ingick inget program för säkerhetsanalyser av anläggningar för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall.

Kasam underströk i sin granskning av Fud-program 2004 värdet av säkerhetsanalys som instrument för att identifiera och inrikta den forskning som bedrivs inom programmet.

Inom flera områden har kunskapsnivån ökat sedan Fud-program 2004. De viktigaste redovisas i kapitel 37 som behandlar forskning som stödjer säkerhetsanalyserna.

Program

Beskrivs i avsnitt 36.2 till och med 36.5 för respektive typ av slutförvar.

36.1 Föreskrifter för säkerhet och strålskydd

Utformningen av en säkerhetsanalys – och framför allt de kriterier som ska användas för att avgöra om förvaret är säkert – anges i föreskrifter från säkerhets- och strålskyddsmyndigheterna. Föreskrifterna utgår från övergripande lagar. De viktigaste av dessa är miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen. Strålskyddsfrågor hanteras också inom en rad internationella organ. Internationella regler och rekommendationer ligger ofta till grund för den nationella lagstiftningen.

36.1.1 Föreskrifternas tillämpning på slutförvarens driftskede

SKIFS 2004:1 och SSI FS 2000:12 omfattar driftskedet för slutförvaret för radioaktivt avfall. De tillämpas på driften av SFR 1.

I enlighet med SKIFS 2004:1 och drifttillståndet från år 1988 genomfördes en ASAR (As-operated Safety Analysis Report) för SFR 1 år 2005, vilket beskrivs i avsnitt 35.3.1. Nästa ASAR för SFR 1 kommer att genomföras och delges myndigheterna år 2015.

36.1.2 Föreskrifternas tillämpning på slutförvarens förvaringsskede

Föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljö vid slutligt omhändertagande av använt kärnavfall, SSIFS 1998:1, har tillkommit efter det att SFR 1 togs i drift 1988. Därför är de delar av föreskrifterna som avser platsval, utformning etc inte tillämpliga på den anläggningen. Analysen av den långsiktiga säkerheten vid anläggningen bedöms dock mot föreskriften. Sålunda tillämpas till exempel riskbegreppet även för SFR 1, i stället för enbart ett dosmål som utgjorde kravet vid den ursprungliga licensieringen av SFR 1.

Föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall är utgivna av SKI, SKIFS 2002:1 med tillhörande allmänna råd. Slutsatserna i säkerhetsanalyserna jämförs med SKI-föreskriften. Hänsyn tas till att SFR 1-anläggningen konstruerats och byggts innan föreskrifterna utarbetats.

36.2 SKB:s säkerhetsstrategi

SFR och SFL ska uppfylla samhällets krav på säkerhet och god miljö så som de uttrycks i lagar och föreskrifter. Anläggningarna ska också uppfylla ägarnas krav på säkerhet och effektivitet.

Några viktiga säkerhets- och strålskyddsprinciper som ligger till grund för utformning och drift av SKB:s anläggningar för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall är:

- Flerbarriärprincipen – säkerheten ska baseras på flera säkerhetsfunktioner upprätthållna av flera barriärer.
- Djupförsvar – säkerhet och säkerhetstänkande ska genomsyra såväl utformning av barriärerna som rutinerna avsedda att begränsa stråldoser och förhindra olyckor.
- Människor, djur och miljö ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning och framtida generationer och miljöer får inte exponeras för större stråldoser och/eller risker än de i dag accepterade.
- Det ska råda balans mellan strålskydd under drift och den långsiktiga säkerheten.
- För att begränsa osäkerheter och optimera strålskydd ska en god och tillförlitlig teknik användas.
- Anläggningen ska ha ett fysiskt skydd som försvårar intrång från obehöriga.
- Vidare ska anläggningen utformas med hänsyn till miljön samt brukarnas och de kringboendes säkerhet. Anläggningen ska också kunna ta emot besökare.

Mot bakgrund av ovanstående är målet med SFR och SFL att slutförvara låg- och medelaktivt avfall på ett ur alla avseenden säkert sätt, med begränsad inverkan på miljön och till acceptabla kostnader.

Inom flera områden har kunskapsnivån ökat under senare år. De viktigaste redovisas i kapitel 37. I tillägg till dessa forskningsinsatser för analyser av den långsiktiga säkerheten vid SFR 1 har beräkningsmodellen Amber tillämpats som alternativ till de beräkningsmodeller som tidigare använts för SFR 1.

Planerade säkerhetsredovisningar för slutförvar för låg- och medelaktivt avfall:

Redovisning, typ	Redovisning, år	Huvudsaklig omfattning av redovisning
SAR SFR 1 (befintligt SFR)	2007/2008	Drift- och långsiktig säkerhet i befintligt SFR 1 (driftavfall)
PSAR SFR (utbyggt SFR)	2013	Drift- och långsiktig säkerhet för det utbyggda SFR innehållande såväl driftavfall som rivningsavfall
ASAR SFR 1	2015	Erfarenhetsåterföring från drift av SFR 1
PSAR SFL	2016	Bedömning av långsiktig säkerhet för förvar för långlivat avfall

36.3 Slutlig säkerhetsredovisning (SAR) för SFR 1

Nya modeller för analys av den långsiktiga säkerheten i anläggningen har applicerats sedan den senaste uppdateringen av säkerhetsanalysen för SFR 1. Transportberäkningar för radionuklider genomförs numera probabilistiskt med beräkningsprogrammet Amber. Kunskap från bland annat säkerhetsanalysen SR-Can /36-1/ tas till vara. Underlag för säkerhetsanalysen från utredningar och forskning har tagits fram.

Program

En ny SAR avseende drift- och långsiktig säkerhet i befintligt slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken färdigställs vid årsskiftet 2007/08. I denna beskrivs dels säkerheten under drift av anläggningen, dels den långsiktiga säkerheten efter förslutning. Säkerhetsredovisningen görs fullständig i den meningen att den är tillräckligt omfattande och detaljerad för att ersätta tidigare genomförda studier.

För driftskedet analyseras normala betingelser samt konsekvenserna av postulerade incidenter som till exempel hanteringsmissöden och brand i anläggningen. För analys av säkerheten efter förslutning finns ny och förbättrad kunskap inom flera områden, se kapitel 37.

De nya avfallsprognoserna visar att fördelningen mellan olika radionuklider i avfallet är något annorlunda än vad som antogs i tidigare säkerhetsanalyser. Väsentliga förändringar som dessa måste tas hänsyn till i den nya analysen. Detta innebär att vissa nuklider kommer att överstiga de värden som satts som strålskyddsvillkor av myndigheterna. Eftersom de nuklidmängder som låg till grund för gällande strålskyddsvillkor, givna 1988, var prognostiserade mängder och inte baserade på gränsvärden för tillåtna doser till omgivningen (eller risk, ett begrepp som senare kommit till användning) kan ett större innehåll av vissa nuklider fortfarande vara acceptabelt vad gäller uppfyllande av myndigheternas krav på långsiktig säkerhet. Varken nya eller gamla prognoser över total mängd radionuklider i förvaret överskrider de aktivitetsmängder som ansatts för fullt förvar. I säkerhetsanalyserna beräknas risken både för ett realistiskt radionuklidinventarium (prognosvärde) och för ett fullt förvar, det vill säga när prognosvärdena uppräknats till maximalt totalinventarium i förvaret enligt tillståndet. Förutom att visa att säkerheten vid anläggningen är uppfylld med det nya nuklidinventariet måste också nya strålskyddsvillkor sökas, baserade på det nya nuklidinventariet för driftavfallet.

När ansökan om en utbyggnad av SFR lämnas in år 2013 kommer denna att innehålla ett nuklidinventarium som återspeglar både driftavfallet från kärnkraftverken och de förväntade aktivitetsmängderna i rivningsavfallet, se avsnitt 36.4. Det nya nuklidinventariet innebär att ett nytt regeringstillstånd kommer att krävas efter att ansökan lämnats in år 2013.

I kommande uppdatering av säkerhetsanalysen för SFR kommer merparten av spridningsberäkningarna att genomföras med probabilistiska metoder. Detta gäller centrala delar som sorptionsdata, flödesvägar för grundvatten i såväl tekniska barriärer som i berget samt vid biosfärmodelleringen. På detta sätt erhålls en bättre uppfattning om osäkerheten i indata och beräkningar jämfört med tidigare använda deterministiska metoder.

36.4 Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) för utbyggt SFR

I de utredningar kring avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar, som genomförts och genomförs, erhålls successivt mer detaljerad kunskap om det avfall – från drift och rivning av kärntekniska anläggningar – som ska deponeras i slutförvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Kunskapen används som grund för planering av slutförvarets utformning och för analys av anläggningarnas säkerhet vid drift och efter förslutning.

Program

I det pågående utbyggnadsprojektet för SFR utgör säkerhetsredovisningen en viktig del, då den ska visa att säkerhets- och strålskyddskraven kan uppfyllas med den tänkta utbyggnaden. En PSAR ska medfölja ansökan om tillstånd för att bygga ut SFR. Ansökan ska enligt planerna lämnas in till myndigheterna för bedömning år 2013.

Utformning och säkerhetsredovisning av den utbyggda anläggningen baseras till stora delar på det som gjorts och görs för det befintliga SFR. Avfallsprognoserna för SFR kompletteras med prognoser över tillskott från rivning av kärnkraftverken och enligt separata avtal med tillståndshavare för andra kärntekniska anläggningar även tillskott från dessa anläggningar.

Data för förläggningsplatsen kompletteras genom ytterligare undersökningar av berget i det aktuella området för utbyggnaden och den hydrogeologiska modellen kompletteras. Säkerhetsanalysen planeras omfatta befintligt SFR samt tillkommande avfall för etapp 1 av utbyggnaden. För att illustrera konsekvenserna av ett fullt utbyggt förvar antas att all prognostiserad aktivitet från rivning och i driftavfall deponeras i befintligt SFR samt i utbyggnadens etapp 1. För optimering av utnyttjandet av slutförvaret planeras för en ansökan om en gemensam licens för befintligt och utbyggt förvar där avfallet på bästa sätt kan fördelas mellan de olika förvarsdelarna.

36.5 Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) för SFL

Någon systematisk analys av slutförvaring av långlivat låg och medelaktivt avfall har inte skett sedan föregående Fud-program. Bedömningar av möjligheterna för slutförvaring av nya avfallstyper och avfallskollin har dock genomförts baserat på dels den analys av ett möjligt slutförvar som genomfördes 1999 /36-2/, dels på erfarenheter från drift och analys av SFR. Tills vidare görs bedömningarna av nya avfallstyper för SFL med förbehåll att omkonditionering ska vara möjlig.

Planering

När ansökan om utbyggnad av SFR har färdigställts planeras en förnyad avfallsinventering och en uppdatering av säkerhetsbedömningarna för SFL-anläggningen. Eftersom platsval för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall inte har gjorts kommer generella platsdata att användas. Eventuellt kommer data från någon/några av de platser som undersökts i samband med slutförvaret för använt kärnbränsle att användas. Den detaljerade planeringen redovisas i senare Fud-program.

36.6 Säkerhetsbedömning av markförvar

I samband med avvecklingen och rivningen av kärnkraftverken kommer en del av rivningsmaterialet att innehålla mycket små mängder radioaktivitet. I dessa fall kan en dekontaminering och friklassning för fri användning av materialet bli omfattande och kostsam, varför deponering i ett ytnära förvar (markförvar) kan vara att föredra. Ett sådant förfarande kan också bidra till en lägre stråldos till personal och omgivning än vad dekontaminering och friklassning skulle innebära.

Markförvaring innebär att en tids institutionell övervakning av anläggningen krävs efter avslutad deponering. De förslag till föreskrifter för markförvar som SSI tagit fram ger möjlighet att utforma förvar för mycket lågaktivt material, som kan friklassas efter en övervakningsperiod på 50–100 år.

Markförvaring i SKB:s regi har tidigare inte presenterats. I Fud-program 2004 indikerades att en utredning planeras för perioden fram till år 2010.

Planering

SKB avser att undersöka möjligheterna att tillhandahålla markförvar för mycket lågaktivt rivningsavfall. Flera alternativ kommer att undersökas – utökning av befintliga markförvar vid kraftverken, nya lokala förvar samt ett centralt markförvar. Baserat på de rivningsstudier som genomförts och som kommer att genomföras för kärnkraftverken under de kommande åren, uppskattas de avfallsmängder som skulle kunna komma ifråga för markförvaring.

37 Forskning

Den forskning som bedrivs av SKB inom Loma-programmet har till syfte att ta fram data och modeller för att uppskatta nuklidinventariet, samt att analysera den långsiktiga säkerheten för barriärerna i SFR. SKB bedriver ingen egen forskning inom rivningsområdet, däremot inhämtas erfarenheter från olika rivningsprojekt i andra länder.

Kasam är positiv till SKB:s program för forskning om frågor avseende låg- och medelaktivt avfall.

SKI efterlyser krav och kriterier på betongens fysikaliska integritet. Dessa ingår i säkerhetsanalyserna. Forskning medför att kunskapen om betongens egenskaper blir bättre, vilket leder till att mindre konservativa antaganden kan användas i säkerhetsanalysen. Denna forskning pågår ständigt, om än inte alltid i SKB:s regi.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2004

SKB har genomfört en detaljerad rivningsstudie för Oskarshamn 3 /37-1/ vilken presenterades under 2006. I denna studie ingår både tekniker och strategier för rivning, beräknade avfalls- och aktivitetsmängder, samt tidsplaner och kostnadsberäkningar. Studien utgör referens för övriga BWR-anläggningar och beskrivs utförligt i kapitel 40. Även en studie över driften av kärnkraftverk under rivningsperioden har genomförts liksom en studie av rivning av byggnader /37-2, 37-3/.

Studier som rör slutförvaret SFR 1 har genomförts eller pågår inom områdena betong- och bentonitdegradering samt uppskattning av aktivitet i avfallet genom studier av korrelationsfaktorer mellan svärmätbara nuklider och nyckelnuklider.

Det är inte möjligt att kartlägga det exakta nuklidinnehållet i samtliga avfallskollin, eftersom flera nuklider är svåra att mäta. Eftersom en stor del av driftavfallet ännu inte har producerats, kan en uppskattning av det totala nuklidinventariet för ett slutförvar inte bara baseras på mätdata. SKB använder korrelationsfaktorer mellan mätbara och svärmätbara nuklider och en prognos för framtida avfallsmängd.

För att kunna uppskatta nuklidinventariet i driftavfallet i SFR 1 har studier genomförts för att ta fram korrelationsfaktorer mellan de mätbara nyckelnukliderna (kobolt-60, cesium-137, plutonium-239 och plutonium-240) och de svärmätbara nukliderna (till exempel kol-14, nickel-59, nickel-63, molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135). Skillnaderna i korrelationsfaktorer mellan olika reaktortyper (BWR/PWR) har analyserats. Analyserna omfattar även olika driftsätt, till exempel HWC (hydrogen water chemistry) eller NWC (normal water chemistry). Studierna finns utförligt beskrivna i ett flertal rapporter /37-4, 37-5, 37-6, 37-7, 37-8, 37-9, 37-10, 37-11, 37-12, 37-13/.

Osäkerheter i korrelationsfaktorer för nära 40 olika nuklider har kvantifierats i en studie som bygger på både statistiska metoder och kvalitativa bedömningar /37-5/. Eftersom nukliderna i avfallet har bildats på olika sätt (aktivering, fission, transuran) har man i studien haft som utgångspunkt att aktiveringsprodukterna korrelerar till kobolt-60, fissionsprodukterna till cesium-137 och transuranerna till plutonium-239 och plutonium-240. Man har i studien noterat att osäkerheten i korrelationsfaktorerna för ett antal nuklider är väldigt stor. Detta orsakas till stor del av brist på tillräckligt bra mätdata. Korrelationsfaktorerna är generellt uppskattade för att passa samtliga sorters avfall. För att få större noggrannhet påpekas i studien /37-5/ att korrelationsfaktorerna kan göras specifika för olika avfallstyper. Nackdelen är då att det bli mer komplicerat att uppskatta nuklidinventariet.

Sorptionskoefficienten är en nyckelparameter i de modeller som uppskattar nuklidernas transportförmåga genom de olika barriärerna i ett slutförvar. En studie har genomförts som rör osäkerheterna hos olika nuklidens sorptionskoefficienter i bland annat betong och bentonit /37-4/. I studien har ett semi-kvantitativt angreppssätt använts.

Mätningar har genomförts på kärnkraftverkens jonbytmassor för att kunna uppskatta den totala aktivitet av nickel-59 och nickel-63 som uppkommer under kärnkraftverkens totala drifttid /37-6/.

Med mätningarna som grund har beräkningar gjorts för att uppskatta det totala aktivitetsinnehållet i de jonbyttarmassor som kommer att deponeras i SFR, antaget att reaktorerna har en drifttid av 40 år (förutom Barsebäck 1 och 2). Fortlöpande mätningar av Ni-förekomsten i PWR-avfall kommer att genomföras.

Forskare vid Lunds Universitet har genomfört kol-14-mätningar på jonbyttarmassor och processvattensystem i både BWR- och PWR-anläggningar. Kol-14 har hög mobilitet och är en av de nuklider som måste modelleras i scenarier för framtida utsläpp från SFR, eftersom den ger ett dominerande dosbidrag i ett framtida troligt scenario. För att kunna modellera framtida utsläpp och migration av kol-14 från SFR krävs att det finns tillfredsställande data för kol-14-inventariet. Nukliden är svårsmälbar i driftavfallet och inventariet har hittills beräknats via korrelationsfaktorer baserade på kobolt-60. Korrelationsfaktorerna är behäftade med stora osäkerheter. Att kunna mäta kol-14 direkt i jonbyttarmassorna är därför av stor vikt för att få tillförlitliga data. En ny metod har utvecklats där både organiskt och oorganiskt kol-14 kan mätas i jonbyttarmassorna och i processvattensystemen. Metoden och resultaten finns beskrivna i en rapport /37-7/. Fler mätningar av kol-14 kommer att göras i framtiden för att verifiera metoden. På grund av den stora osäkerheten i korrelationen mot kobolt-60 kommer kol-14 fortsättningsvis att korreleras mot i kraftverken producerad energi och med en faktor av producerad mängd kol-14 som ger den beräknade mängden kol-14 i avfallet.

Bland fissionsprodukterna finns jod-129, som har lång halveringstid och lågt strålningsutbyte vid sönderfall. Detta kombinerat med låg aktivitet i reaktorvatten och avfall gör att nukliden inte kan mätas ens med rimligt sofistikerade metoder. På grund av den långa halveringstiden har I-129 dock ett radiologiskt intresse ur ett långtidsperspektiv. En metod för att bestämma aktivitetsmängder av jod-129 i reaktoravfall har tagits fram. Metoden bygger på de mätbara nukliderna jod-131 och cesium-137 i kombination med bränsleläckagemodeller för BWR- och PWR-bränsle. Utgående från detta görs en uppskattning av den ackumulerade aktiviteten av jod-129 till och med 2004, och en prognos för reaktordriften fram till 2020. Korrelationsfaktorerna är framtagna ur tidigare insamlade mätdata. Metoden och resultaten beskrivs utförligt i en rapport /37-8/.

Modellen som används för att uppskatta jod-129 i driftavfallet har vidareutvecklats för att även omfatta de långlivade nukliderna molybden-93, teknetium-99 och cesium-135. En modell för aktivering av korrosionsprodukten molybden som källa både för molybden-93 och teknetium-99 har införts. Bränsleläckagehistoriken har stämts av mot uppmätta värden för jod-131 och cesium-137 i kylmedel och avfall. Som en komplettering till detta har även en avstämning gjorts mot uppmätta värden av molybden-99 och teknetium-99m i kylmedlet. Båda dessa är modernnuklider till teknetium-99. Nya korrelationsfaktorer för ovan nämnda nuklider har tagits fram och resultaten beskrivs tillsammans med uppskattat aktivitetsinventarium i en rapport /37-9/.

En litteraturstudie har genomförts /37-10/ med syfte att uppdatera korrelationsfaktorerna presenterade för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall 1998. Dessa korrelationsfaktorer har även delvis använts för att uppskatta ett referensinventarium för avfallet som deponeras i SFR 1. Avfallet i SFR 1 består av driftavfall såsom till exempel jonbyttarmassor och innehåller ingen eller endast mycket små mängder inducerad aktivitet. I litteraturstudien /37-10/ har även en ny värdering för Crud gjorts. Dock bör det påpekas att data för jonbyttarmassor har givits högre prioritet än ytkontamination när korrelationsfaktorerna tas fram. Några studier för transuraner och strontium-90 ingår inte.

Forskare vid Luleå Tekniska Universitet genomför en studie om hur betong och bentonit påverkas och degraderas av frysning vid permafrost. Detta är intressant i ett långtidsscenario för SFR. Studien är inte färdig, varför inga resultat kan presenteras i detta Fud-program.

En litteraturstudie av hur marken och berget påverkas av permafrost har genomförts /37-11/. Studien startade 2001 och avslutades 2003. Rapporten summerar kunskapsläget inom permafrostutveckling och tar upp såväl hur permafrost uppträder som dess utbredning på ytan och mot djupet. Vidare behandlas hydrologiska frågor, samt mekaniska och kemiska effekter.

En annan studie uppskattar osäkerheten vid kalibreringen av den hydrogeologiska modellen för SFR. Ett syfte med denna studie var att se hur kalibreringen påverkar massflödet i de olika tunnarna. Förutsättningar och resultat finns beskrivna i /37-12/.

BRGM i Frankrike har på SKB:s uppdrag utvecklat en modell /37-13/ för hur flerbarriärsystemet i silon i SFR beter sig ur geokemisk synvinkel. Modellen ska användas i säkerhetsanalysen. Beräkningarna har genomförts med datorkoden Phast för 500, 10 000 och 100 000 år.

Kemisk degradering av betong och bentonit studeras för närvarande, och studien som är specifik för SFR 1 bygger på en termodynamisk modell. Modellen tar hänsyn till saltvattnets påverkan. Dessutom hanterar den ett längre tidsperspektiv (tiden efter permafrost) än föregående studier. I studien ingår även hur varierande porositet i betongen och bentoniten påverkar den långsiktiga säkerheten.

Beräkningsmodellen Amber har tillämpats för spridningsberäkningarna i analysen av den långsiktiga säkerheten vid SFR 1. Amber är ett alternativ till de beräkningsmodeller som tidigare använts för SFR 1 /37-14/.

Studier pågår rörande komplexbildning av radionuklider med organiska nedbrytningsprodukter. Vid Chalmers Tekniska Högskola görs laboratoriestudier av nedbrytning av cellulosa och mätning av nedbrytningsprodukternas komplexbildningsstyrka. Vidare pågår vid Enviro i Spanien ett utvecklingsarbete för att modellera komplexbildande ämnens inverkan på radionuklidutsläpp från SFR 1.

Program

Ett förprojekt inför utbyggnaden av SFR har påbörjats under 2007, där bland annat bergundersökningar kommer att ingå. I förprojektet, samt i en senare projektfas kan det uppkomma behov av forskning.

Ingen ytterligare forskning, förutom de redan pågående studierna om betong, komplexbildning och korrelationsfaktorer är för närvarande beslutade.

38 Strategier för rivning

Avvecklingen av en kärnteknisk anläggning påbörjas när den huvudsakliga verksamheten upphör, med syfte att inte återupptas, och fortsätter till dess att anläggningen är friklassad och inte av radiologiska skäl förhindrar etablering av annan verksamhet på platsen. Under tidsperioden måste tillståndshavaren tillförsäkra sig om att anläggningen bibehålls i ett skick som på ett säkert sätt skyddar människor och miljö.

Arbetet med att ta fram strategier för att avveckla och riva kärnkraftverken sker i samarbete mellan SKB och tillståndshavarna. Representanter från SKB och de fyra kärnkraftverken diskuterar detta i en gemensam arbetsgrupp. Strategierna för att avveckla och riva kärnkraftverken kommer att skilja sig åt mellan de olika anläggningarna. Det beror delvis på att kraftverken har olika ägare med sinsemellan olika intressen. SKB:s uppgift är att samordna strategierna, så att de är förenliga med en säker och effektiv hantering och slutförvaring av det uppkomna avfallet. Skillnaderna när det gäller rivningsstrategier är tydligast för de två redan avställda reaktorerna i Barsebäck. För dessa pågår planeringen för rivningen. De andra blocken moderniseras i stället för att livstiden ska kunna ökas till mer än 40 år. Forsmark och Ringhals planerar att driva sina anläggningar i 50 år. För OKG:s del har styrelsen fattat beslut om att reaktorerna ska drivas i 60 år.

I detta kapitel presenterar vi tre olika rivningsstrategier:

- SKB:s huvudstrategi, se avsnitt 38.1.
- Tidpunkt för rivning, se avsnitt 38.2.
- Tillståndshavarnas strategi, se avsnitt 38.3.

38.1 SKB:s huvudstrategi

Det är viktigt att påpeka att det är tillståndshavarnas egen planering som gäller vid avvecklingen av kärnkraftverken. SKB bedriver forskning på uppdrag av sina ägare och är rådgivande i frågorna om strategier, men SKB ställer inga krav på hur eller när ägarna ska avveckla sina block.

Detta avsnitt behandlar SKB:s huvudstrategi för att ta hand om det radioaktiva avfall som uppkommer vid rivningen av kärnkraftverken.

Kasam påpekade i sin granskning av Fud-program 2004 att rivning av kärnkraftverk inte är kontroversiellt från en teknisk/naturvetenskaplig synpunkt. Kasam påpekade även att SKB bättre bör redovisa skälen för sin planering, exempelvis med avseende på frågan om tillfällig mellanlagring av hårdkomponenter. Ett förtydligande från SKB:s sida finns under rubriken Program nedan.

SSI ansåg i sin granskning av Fud-program 2004 att rivning bör ske så snart som det är rimligt möjligt efter avslutad drift. Detta är också SKB:s och tillståndshavarnas strategi med beaktande av att ett slutförvar ska finnas tillgängligt för huvuddelen av avfallet. SKB och tillståndshavarna vill om möjligt undvika mellanlagring av stora volymer rivningsavfall i väntan på att ett slutförvar blir färdigt.

SSI ansåg även att SKB bör intensifiera arbetet med rivningsfrågor, för att i Fud-program 2007 kunna redovisa detaljerade planer och överväganden. Därvid bör de avvecklingsplaner reaktorinnehavarna är skyldiga att ta fram beaktas, till exempel med avseende på analys av anläggningens status, aktivitetsinnehåll och kompetens i rivningsfrågor. SSI ansåg slutligen att det borde vara ett villkor för SKB:s fortsatta verksamhet att det till Fud-program 2007 tas fram en bättre redovisning av strategi och tidsplaner för rivning och omhändertagande av avfall från rivning, inklusive planer för markförvar, bland annat mot bakgrund av beslut att stoppa driften av Barsebäck 2.

Planering

Ett stort arbete har genomförts under 2000-talet då det gäller att ta fram avvecklings- och rivningsstrategier i det för kärnkraftindustrin gemensamma projektet Skapa. Det huvudsakliga resultatet från arbetet har sammanställts /38-1/.

SKB:s och tillståndshavarnas strategi är att börja riva en anläggning så snart den ställts av för gott och det resulterande avfallet kan skickas till ett godkänt slutförvar. På så sätt undviker man en lång servicedriftsperiod. För att kunna uppfylla detta planerar SKB att bygga ut SFR för att kunna ta emot kortlivat låg- och medelaktivt avfall från rivningen av blocken. Utbyggnaden av SFR blir klar år 2020. Huvudstrategin kan således inte tillämpas för Barsebäcksverket.

Ett förprojekt om utbyggnaden av SFR har startats under 2007. Tanken är att bygga ut anläggningen i två etapper. Den första etappen kommer att rymma rivningsavfallet från Barsebäck 1 och 2. Särskilda avtal kan komma att tecknas för omhändertagande av avfallet från Studsviks R2-reaktor och Ågestareaktorn. Den inledande etappen kommer även att rymma den ökade mängden driftavfall, som uppkommer då Forsmark, Ringhals och Oskarshamn förlänger sina drifttider.

Under 2008 kommer bergundersökningarna att påbörjas i anslutning till den befintliga anläggningen för att få bättre kännedom om bergets struktur. Bergundersökningarna beräknas bli klara under år 2010. Resultaten kommer att ligga till grund för beslutet om förläggning av utbyggnaden av etapp 1.

Licensieringsarbetet, det vill säga arbetet med att bland annat ta fram den preliminära säkerhetsrapporten (PSAR), kommer att påbörjas parallellt med de pågående bergundersökningarna. Detsamma gäller arbetet med miljökonsekvensbeskrivningen, samt med projektering och byggplan. För licensieringsarbetet och miljökonsekvensbeskrivningen ska samgranskning och färdigställande av dokumentationen ske 2013 enligt planen. Därefter kan en ansökan om utbyggnad lämnas till myndigheterna.

Ett godkännande för byggstart beräknas komma mellan 2015 och 2016. Arbetet med utbyggnaden kan därmed starta under 2016 och beräknas pågå cirka fyra år. Utbyggnaden kan delas upp i följande steg: upphandling av entreprenad, sprängningsarbeten, schaktning, installation och sammankoppling av system med befintligt SFR. Provdriften av det utbyggda SFR planeras kunna starta tidigast i slutet av 2019, medan starten för den rutinmässiga driften planeras ske under 2020.

I tidsplanen för utbyggnaden har ingen hänsyn tagits till förseningar som beror på att bygglovet eller drifttillståndet skjuts upp på grund av eventuella överklaganden. Tidpunkten för utbyggnaden av den andra etappen har inte beslutats ännu men med 50–60 års drifttid på kärnkraftverken och därefter en tidig rivning bör utbyggnaden stå färdig omkring år 2030.

Långlivat avfall mellanlagras i dag i bassänger i Clab. Mellanlagringen av hårdkomponenter i Clab är dyr och tar upp utrymme, som i stället skulle kunna användas för att mellanlagra använt kärnbränsle. Långlivat avfall, som till exempel hårdkomponenter från både drift och rivning av samtliga kärnkraftverk, ska därför enligt planerna mellanlagras torrt i en anläggning som kallas Bergrum för avfall (BFA) på Simpevarpshalvön. OKG utnyttjar redan i dag BFA för torr mellanlagring. SKB har enligt avtal rätt att utnyttja en del av utrymmet i BFA. För att anläggningen ska kunna användas för att ta emot hårdkomponenter från andra kärnkraftverk än Oskarshamn måste den omlicensieras. Detta ombesörjer OKG, eftersom det är de som i dag har drifttillståndet för att mellanlagra avfall i BFA.

Nyckelfrågan vid mellanlagring av hårdkomponenter är att ta fram en ny typ av avfallstransport-behållare (ATB-1T). Det är detta som är tidskritiskt för när transporten och mottagningen av hårdkomponenter från andra kärnkraftverk än Oskarshamn kan komma igång. Enligt planerna kan mellanlagring av hårdkomponenter påbörjas tidigast 2011.

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet kommer att mellanlagras i BFA till dess att slutförvaret för låg- och medelaktivt avfall (SFL) står färdigt. Detta beräknas vara driftklart tidigast år 2045, då merparten av de svenska kärnkraftverken har rivits. Beslutet om var SFL ska byggas kommer att fattas om ett par decennier.

När det gäller att riva och ta hand om friklassat och konventionellt avfall så ligger frågan utanför SKB:s åtagande gentemot ägarna. SKB har därför ingen strategi för detta. Det är upp till tillståndshavarna om de vill riva även de inaktiva delarna och i så fall när.

38.2 Tidpunkt för rivning

Barsebäck 1 ställdes av den 30 november 1999 efter en uppgörelse mellan staten, Vattenfall och Sydkraft. Alldeles efter det att Fud-program 2004 publicerats beslutade regeringen att även Barsebäck 2 skulle ställas av. Detta skedde slutligen den 31 maj 2005. Efter avställningen av båda reaktorerna på Barsebäcksverket, samt avställningen av Studsviks R2-reaktor den 15 juni 2005, har myndigheterna aktualiserat frågan om avveckling och rivning av kärnkraftverken.

Vid granskningen av Fud-program 2004 betonade myndigheterna att SKB till Fud-program 2007 skulle lägga stor vikt vid frågor som rör rivning och rivningsavfall. I regeringens beslut om Fud-program 2004 står att en utredning bör göras, som visar vilken som är den kortaste tiden som krävs för att en tillståndsprocess för slutlagring av rivningsavfall kan påbörjas. I avsnittet nedan görs en bedömning av de scenarier som leder till snabbast möjliga omhändertagande av rivningsavfall.

Regeringen angav att SKB bör se över skälen till att vänta med ett slutförvar för långlivat avfall tills merparten av alla kraftverk rivits. Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) beräknas stå klart tidigast år 2045 enligt SKB:s huvudtidsplan. SKB anser att det i dag inte finns skäl att påbörja byggandet av slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall eftersom avfallsvolymererna ännu är små och anläggningen kommer att vara den sista av SKB:s anläggningar inom Loma-programmet i drift. En tidig utbyggnad bedöms ge en omotiverat lång drifttid.

SKI bedömde att det kortlivade rivningsavfallet från reaktorerna vid Barsebäck troligen kan rymmas i redan godkända typbeskrivningar för avfall avsett för SFR. SKB delar denna uppfattning. Däremot gäller koncession och tillstånd för SFR 1 i dag endast driftavfall. Anläggningen måste således licensieras om för att ta emot rivningsavfall även om avfallet som sådant är passligt för befintliga typbeskrivningar.

Den preliminära tidsplanen för att bygga ut SFR för att kunna ta emot rivningsavfall innehåller inga marginaler för att kunna starta driften tidigare än 2020. För att kunna starta rivningen av Barsebäck tidigare än 2020 är ett alternativt scenario, som SSI föreslagit, att SKB redan nu omlicensierar SFR 1 för att kunna ta emot rivningsavfall från Barsebäck redan innan SFR byggs ut.

Eftersom Barsebäcks andel i det befintliga SFR 1 inte räcker till mer än en bråkdel av det radioaktiva rivningsavfall som förväntas uppkomma vid rivningen, behöver övriga intressenters andelar tas i anspråk av Barsebäck. Det är inte realistiskt att övriga intressenter avstår sina andelar i SFR. Dessa andelar är avsedda för driftavfall, vilket skulle kunna leda till oönskade konsekvenser för driften av blocken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals vid en försening av driftstarten för det utbyggda slutförvaret.

I de utrymmen i SFR där det i dag finns deponeringsmöjligheter får bara avfall som behandlats och förpackats på ett sätt som inte är nödvändigt för större delen av rivningsavfallet deponeras. Längre tid för rivning och högre stråldoser till personalen än med den planerade utformningen av avvecklingsprojekten blir följden.

Ett annat scenario för att kunna starta rivningen av Barsebäck 1 och 2 före 2020 är att bygga ett temporärt mellanlager för rivningsavfall, innan utbyggnaden av SFR står klar. Den mest tidskrävande faktorn inför byggandet av ett mellanlager är licensieringen. Licensiering och byggandet av ett mellanlager för rivningsavfall skulle enligt en för Barsebäck redovisad utredning ta i princip lika lång tid som att licensiera om och bygga ut SFR. Den möjliga tidsvinsten uppskattas till cirka ett år /38-2/. En ytterligare faktor att beakta om man väljer att bygga ett mellanlager är att miljöpåverkan blir större på grund av att antalet transporter blir många fler. Avfallet ska först transporteras till mellanlagret och sedan därifrån. Även bygget och några år senare avveckling och rivning av ett mellanlager ger en extra miljöpåverkan.

SKB:s bedömning är att det snabbast möjliga alternativet, med beaktande av Alara och BAT, för att ta hand om det radioaktiva rivningsavfallet är SKB:s huvudstrategi som redovisas i avsnitt 38.1. Enligt denna kan det kortlivade rivningsavfallet börja tas omhand år 2020 och det långlivade avfallet kan börja mellanlagras i BFA tidigast i slutet av 2011.

38.3 Tillståndshavarnas strategier

Nedan beskrivs den aktuella generella strategin för att avveckla kärnkraftverken. Strategin kan mycket väl förändras och framför allt bli mer detaljerad i framtiden.

SKI betonade i granskningen av Fud-program 2004 att det är viktigt att de parter som berörs av rivningen för en aktiv dialog som fördjupas under de kommande åren. SKB håller med om detta. Det finns sedan början av 2000-talet en etablerad rivningsgrupp med deltagare från alla kärnkraftverk och SKB.

SSI ansåg att tillståndshavarna inte bör utesluta möjligheten att anläggningsplatserna kommer att kunna återställas helt och därefter utnyttjas på godtyckligt sätt. SKB anser att detta är en strategifråga för tillståndshavarna. Efter att byggnaderna och marken har friklassats radiologiskt är det upp till tillståndshavarna hur de vill utnyttja de kvarvarande byggnaderna.

SSI ansåg att redovisningen skulle behöva kompletteras med den planering och de åtgärder som kraftverken enskilt ansvarar för. Redovisningen förtydligas i detta Fud-program.

SSI ansåg att det bör framgå hur tillståndshavarna avser att genomföra avveckling och rivning, samt hur man avser att hantera de stora mängderna avfall. SKB anser att det är en strategifråga för tillståndshavarna hur de vill genomföra sin rivning. Detsamma gäller för de stora mängder inaktivt avfall som SKB inte omhändertar.

Planering

Målet (tillika kravet) när kärnkraftverken ska avvecklas är att avlägsna radioaktivt material och återställa anläggningen till, enligt definition, en friklassad anläggning. Detta uppnås när det inte längre föreligger restriktioner från myndigheterna för användning av mark eller byggnader. Det innebär att hela anläggningen, det vill säga byggnader inklusive all utrustning och mark ska förklaras friklassad enligt gällande myndighetskrav.

Kraftbolagens gemensamma mål inför avvecklingen av kärnkraftverken är att man efter avvecklingen bör utnyttja platsen för framtida energiproduktion. Detta har sin grund i att man vill använda sig av den väl utbyggda och värdefulla infrastrukturen med elledningar, vägar, hamnar, kylvattenkanaler etc. Även byggnader bör lämnas efter att de friklassats och undantagits från kärntekniklagens krav. De kan utnyttjas för annan verksamhet på platsen.

Kraftbolagen (förutom Barsebäck) har som utgångspunkt i sin strategi och planering att man kommer att driva kraftverken så länge ingen konkurrenskraftig ersättningsteknik finns och så länge det inte finns ekonomiska eller säkerhetsmässiga skäl att starta avvecklingen. Planeringen i dag är att Forsmark och Ringhals har en drifttid på 50 år och OKG 60 år för sina anläggningar.

Rivningen av ett block påbörjas inte innan intilliggande block med gemensamma byggnader och/eller system är avställt. De block som har gemensamma byggnader och/eller system är följande: Barsebäck 1 och 2, Forsmark 1 och 2, Oskarshamn 1 och 2, Ringhals 1 och 2 samt Ringhals 3 och 4. Rivningen kommer sedan att påbörjas så snart som möjligt efter att det använda bränslet lämnat det sist avställda blocket. Alternativt kommer drifttiden att anpassas så att de gemensamma blocken ställs av samtidigt, för att på så sätt undvika en lång servicedriftsperiod.

Rivningen antas ske efter en relativt grundlig dekontaminering av anläggningens processystem. Detta görs för att reducera stråldosen till personalen. Om anläggningen redan från början har låga strålningsnivåer kan denna dekontaminering eventuellt uteslutas. Detta är en bedömning som får göras för varje kraftverksblock från Alara-synpunkt. När rivningen påbörjas antas att systemrivning sker först och att denna tar minst tre år. Därefter saneras byggnader och kontaminerade byggnadsdelar rivs, varefter anläggningsplatsen kan friklassas att användas till annan verksamhet. En rivningstid på cirka fem år medför att ett block kan förväntas vara friklassat för annan användning cirka sju år efter avställning. Detta gäller under förutsättning att det enligt ovan inte finns några angränsande block i drift.

38.3.1 Barsebäck

I och med avställningen av Barsebäck 2 den 31 maj 2005 är samtliga block i Barsebäck avställda. Barsebäck 2 övergick definitionsmässigt till servicedrift den 1 december 2006 då det sista använda kärnbränslet transporterats till Clab. Ny SAR (säkerhetsredovisning) och STF (säkerhetstekniska driftförutsättningar) för driftläge servicedrift har lämnats in till myndigheterna och gäller därmed. Cirka fem personer arbetar i dag med rivningsplanering på Barsebäck.

Servicedriften kommer att pågå till omkring 2017, då en övergång kommer att ske till rivningsdrift via en period för återetableringsdrift. Vid samma tidpunkt kommer även förprojekteringen inför rivning att påbörjas. Den långa servicedriften beror på att slutförvaret för rivningsavfall inte kommer att stå klart förrän år 2020.

Eftersom både Barsebäck 1 och Barsebäck 2 ställdes av innan deras tekniska livslängd var förbrukad, och nu inte har några intäkter, finansierar staten tillsammans med Kärnavfallsfonden avställningsdrift och servicedrift. Denna finansiering upphör 2015 för Barsebäck 1 och 2017 för Barsebäck 2. Efter dessa tidpunkter kommer Barsebäck att använda medel ur Kärnavfallsfonden för att finansiera ytterligare servicedrift och därefter återetablerings- och rivningsdrift.

Barsebäck har fått miljötillstånd för servicedrift. Tillståndet gäller till och med år 2012. För att få förnyat tillstånd för servicedrift krävs en ny domstolsprocess. Enligt nuvarande miljödom får inte Barsebäck rivas. Ansökan om rivning måste först lämnas in till myndigheterna. Dessutom krävs en ny prövning i miljödomstolen.

Rivningen av Barsebäck 1 och 2 kommer sannolikt att bedrivas som ett gemensamt projekt. Slutmålet är att friklassa anläggningen eller att återställa platsen. Detta är inte beslutat ännu.

Tidsplanen för att riva Barsebäck 1 är 2020–2026. För Barsebäck 2 är tidsplanen för rivning 2020–2028. Delar av arbetet kommer att ske samtidigt på båda blocken.

39 Ansvarsfördelning vid rivning

En av de viktigare myndighetskommentarerna vid granskningen av Fud-program 2004 var att ansvarsfördelningen mellan SKB och de enskilda tillståndshavarna för kärnkraftverken bör klargöras och förtydligas, såväl när det gäller val av metoder för rivning och avfallshantering som för kostnadsberäkningar. En annan kommentar var att det bör tydliggöras att SKB:s ansvar endast omfattar att ta hand om det radioaktiva avfall för vilket kraftföretagen inte väljer egna lösningar, såsom markförvar och mellanlager.

I detta Fud-program ges ett förtydligande om hur ansvaret mellan tillståndshavarna och SKB fördelas när det gäller avveckling, rivning, avfallshantering samt kostnadsberäkningar.

Enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet 10 § ska tillståndshavarna för de kärntekniska anläggningarna i Sverige svara för att de åtgärder vidtas som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara i verksamheten uppkommet kärnavfall eller däri uppkommet kärnämne som inte används på nytt. Tillståndshavaren ska också på ett säkert sätt avveckla och riva anläggningar i vilka verksamheten inte längre ska bedrivas.

Det är tillståndshavaren som ansvarar för rivningen och står för planering, tillståndsfrågor och genomförandet av den fysiska rivningen.

SKB ansvarar för att ta hand om det radioaktiva avfallet från rivning. SKB ska således transportera det till ett slutförvar och deponera det. För detta ska SKB bygga ett slutförvar för rivningsavfall, samt vid behov anpassa transportsystemet. SKB svarar även för transporten och mellanlagringen av hårdkomponenter, samt för transporten av dessa från mellanlagret till slutförvaret. Dessutom ska SKB i samråd med tillståndshavarna förvissa sig om att avfallet behandlas och förpackas på ett sådant sätt att det lämpar sig för slutförvaring.

SKB ansvarar – som en del i arbetet med att ta fram underlag för generella avgiftsberäkningar – för att genomföra generella kostnadsberäkningar för rivning av de svenska kärnkraftverken. I detta ingår att ta fram sådant underlag som har betydelse för att beräkna rivningskostnaderna. Detta sker bland annat genom sammanställningar av erfarenheter från genomförda ombyggnadsarbeten på kärnkraftverken. SKB ska vidare bevaka utvecklingen i världen på rivningsområdet samt följa den teknikutveckling som sker, till exempel genom deltagande i OECD/NEA:s samarbetsprogram. Vid arbetet med att ta fram underlag för kostnadsberäkningarna och vid bedömning av avfallsmängder och avfallstyper samarbetar SKB med tillståndshavarna. Genom en särskild rivningsgrupp får SKB synpunkter och råd beträffande de teknik- och strategival som vi använder som underlag för våra rivningsstudier.

När en avveckling av kärnkraftverken kommer närmare i tiden genomförs blockspecifika detaljerade rivningsstudier. Så är till exempel fallet med Barsebäcks avveckling i dag. I detaljplaneringsarbetet kan SKB användas som resurs.

40 Teknik för rivning

I detta kapitel beskrivs planeringen för framtagandet av blockspecifika rivningsstudier samt en sammanfattning av en genomförd detaljerad rivningsstudie av Oskarshamn 3, där olika tekniker för rivning beskrivs.

40.1 Blockspezifika rivningsstudier

SKI betonar att det är viktigt att totala rivningsstudier bör genomföras, så att detaljerade beräkningar av rivningskostnader finns tillgängliga för varje enskilt kraftverk senast 2010.

Behov av blockspezifika rivningsstudier avseende avfallsmängder, avfallstyper och aktivitetsinnehåll föreligger för planering av utbyggnaden av SFR, anpassning av transportsystemet och för de säkerhetsanalyser som ska ligga till grund för ansökan om utbyggnad som lämnas in år 2013. Med den utformning som finansieringslagen tidigare haft med intjänandetid på 25 år var det även motiverat att genomföra kostnadsberäkningar för rivningen i ett tidigt skede. Den i dag gällande skrivningen innebär att det inte finns något behov av detaljerade kostnadsberäkningar före avställning av ett block.

SKB har sedan Fud-program 2004 beställt en detaljerad rivningsstudie av Oskarshamn 3, som avser att vara en referensanläggning för BWR-blocken. Studien har tagits fram av Westinghouse Electric Sweden /40-1/. I rivningsstudien presenteras olika tekniker för rivning, uppkommen mängd avfall och aktivitetsmängder. Även tidsplaner och kostnadsberäkningar för avvecklingen tas upp. Studien beskrivs i avsnitt 40.2.

Planering

SKB kommer tillsammans med kraftbolagen att ta fram verk- och blockspezifika rivningsstudier med målsättning att ge ett säkrare och mer detaljerat underlag för att bedöma avfallsvolymer och aktivitetsmängderna från respektive kärnkraftverk. Studierna kommer successivt att färdigställas och baseras för BWR-anläggningarna på den detaljstudie som har genomförts för referensanläggningen Oskarshamn 3. Undersökningarna anpassas till de specifika förhållanden som råder vid övriga kraftverk i fråga om det fysiska utförandet av kraftverken och i fråga om tillståndshavarnas planering för att avveckla det egna verket. För PWR-anläggningarna kommer en uppdatering av den befintliga studien för Ringhals 2 /40-2/ att utgöra grunden.

Studier av detta slag är avsedda att spegla dagens kunskap och planering. De kommer med all sannolikhet att bli föremål för justeringar och omarbetningar när mer erfarenhet finns tillgänglig och när tillståndshavarnas planer för avveckling har konkretiserats.

40.2 Referensstudie

En detaljerad rivningsstudie av Oskarshamn 3 /40-1/ har genomförts och är avsedd att vara en generell rivningsstudie för BWR-blocken och den ska lätt kunna anpassas för övriga BWR-anläggningar genom justeringar av blockspezifika indata.

40.2.1 Studiens förutsättningar

I studien görs en uppskattning av anläggningens inventarium (både kontaminerat och icke-kontaminerat material), en radiologisk kartläggning av anläggningen, tillgänglig teknik och sekvenser för rivning, samt en beräkning av de kostnader som förväntas uppstå. System gemensamma med övriga block i Oskarshamn ingår inte i studien.

Två olika strategier har diskuterats då det gäller rivning av själva reaktortanken. Det ena är att segmentera reaktortanken i delar, vilka kan transporteras och deponeras som övrigt rivningsavfall. Det andra scenariot är att lyfta ut reaktortanken ur reaktorbyggnaden intakt och transportera den som sin egen transportbehållare. I studien har endast alternativet med att segmentera reaktortanken analyserats.

Man har även jämfört kostnaderna för att dekontaminera komponenterna mot kostnaden för deponering. Utgångspunkten är då att måttliga dekontamineringsåtgärder genomförs. Stora komponenter och byggnadsdelar med släta ytor förutsätts kunna dekontamineras, medan mindre föremål med krångliga geometrier inte dekontamineras alls, utan transporteras till förvaret. I studien återges även en fullständig kartläggning av olika system och det radioaktiva inventariet i anläggningen. Det förutsätts att slutförvar och deponier finns tillgängligt för att ta emot det rivningsavfall som uppstår. För långlivade hårdkomponenter förutsätts att ett mellanlager är tillgängligt.

40.2.2 Driftskeden

Studien omfattar samtliga driftskeden, från det att verket slutligen ställts av till dess att byggnaderna dekontamineras och friklassats för användning till annan industriell verksamhet.

De driftskeden som identifierats i en rivningsstudie för Oskarshamn 3 /40-1/ följer SKB:s avvecklingsscenarion /40-3/ och definieras nedan. De olika tekniker som används i respektive steg beskrivs i avsnitt 40.2.3.

Avställningsdrift

Perioden från det att blocket slutligen har ställts av till dess att allt bränsle transporterats bort från blocket. I detta driftskede sker en övergång till ny kravbild, bland annat licensieras anläggningen om (ny säkerhetsredovisning) för att senare övergå i servicedrift. Även en omorganisation inför servicedrift och rivningsdrift genomförs i detta skede.

Servicedrift

Servicedriften påbörjas när allt bränsle är borttransporterat från blocket och varar fram till dess att en omfattande rivning av processystem och anläggningsdelar påbörjas.

Återetableringsdrift

Återetableringsdriften inleds då blocket förbereds för rivning om servicedriften pågått en längre tid. Återetableringsdrift innebär att man ser över och uppgraderar de processystem etc som ska användas under nästkommande steg – rivningsdriften. De system som behöver uppgraderas kan vara till exempel hissar, traverser, vatten, tryckluft, elförsörjning, renings- och ventilationssystem. Eventuellt behövs ingen återetablering om servicedriften varit kortvarig.

Rivningsdrift

Rivningsdrift avser blockets drift under perioden från att den fysiska rivningen påbörjas tills hela blocket är friklassat.

Återställande av platsen

Tillståndshavarna beslutar om rivningen av byggnader. Rivningen är beroende av vilken verksamhet som planeras för platsen. Utgångspunkten är att fortsatt energiproduktion ska ske, eftersom infrastruktur finns etablerad med till exempel kraftledningar och vägar.

Perioden omfattar konventionell rivning av byggnader och återställande av marken.

I rivningsstudien för Oskarshamn 3 /40-1/ antas att avställningsdriften varar i två år, och att servicedriften inklusive återetablering pågår i tre år. Detta innebär att rivningen av anläggningen påbörjas fem år efter det att blocket slutligen har ställts av. Visst överlapp sker mellan aktiv och inaktiv rivning för att korta ner rivningstiden.

40.2.3 Tekniska lösningar

I detta avsnitt sammanfattas de tekniska lösningar som presenteras i rivningsstudien för Oskarshamn 3 /40-1/ för att dekontaminera och riva olika system, komponenter och byggnader. Studien har haft som utgångspunkt att endast beprövad teknik ska analyseras. Detta för att man ska vara säker på att den beskrivna tekniken verkligen fungerar, samt att man inte behöver lägga ner pengar och tid för att utveckla verktyg och metoder som ska användas vid rivningen. I vissa fall kommer den teknik man använt för att underhålla anläggningen under dess drifttid att vara den bäst lämpade inför rivningen.

Dekontaminering

Det första steget innan rivningen påbörjas är en kemisk dekontaminering av primärsystemen. Detta görs från Alara-synpunkt för att minimera stråldosen till rivningspersonalen. Den dekontaminerings-teknik som används efter det att blocket slutligen ställts av är betydligt mer aggressiv än de metoder som används under blockets drift. Orsaken till att en mer aggressiv metod inte används under driften är att denna degraderar rörsystemen. Tunna lager av rören samt eventuella korrosionsskydd försvinner, vilket givetvis inte är acceptabelt under driften av anläggningen. Fördelen med en aggressiv metod är att dekontamineringen blir effektivare.

Segmentering av reaktorns interna delar

Att segmentera och plocka ut reaktorns interna delar är ett av de mest tidskritiska momenten i rivningsprojektet. Man vill därför genomföra detta så snabbt som möjligt. Dock måste hänsyn tas till Alara-principen.

Olika segmenteringsmetoder måste användas, eftersom geometrierna hos reaktorns interna delar skiljer sig åt. Dessutom är aktivitetsnivåerna relativt höga, så att segmenteringen måste ske med fjärrstyrda verktyg under vatten.

Reaktortanken

Det finns två olika strategier att tillgå för att ta hand om reaktortanken:

- Lyfta ut reaktortanken i ett helt stycke och sedan transportera och deponera den i förvaret som ett eget kolli.
- Segmentera reaktortanken och transportera bort den i delar som annat rivningsmaterial till ett slutförvar.

Vilken strategi man väljer beror framför allt på reaktortankens storlek (större på BWR) samt möjligheterna att lyfta ut reaktortanken ur reaktorbyggnaden. Möjligheten att transportera bort reaktortanken i ett stycke till ett slutförvar, som är anpassat för att ta emot ett kolli av den storleken, spelar också roll. I de flesta rivningsprojekt som genomförts i USA har reaktortanken transporterats iväg i ett stycke. I rivningsstudien för Oskarshamn 3 har strategin att reaktortanken segmenteras och transporteras bort i delar valts.

Kapning av rör

Ett antal olika tekniker finns att tillgå för att kapa rör. Den metod man väljer beror i första hand på aktivitetsnivån i utrymmet där röret ska kapas. Är det ett utrymme med hög aktivitet används en metod där det går fort att rigga upp en fast monterad skärutrustning på röret. Utrustningen kan sedan fjärrstyras från ett utrymme med låg aktivitet. I utrymmen med låg aktivitet kan metoder användas där operatören är i kontakt med röret.

Övriga ståldetaljer

Utformningen samt placeringen av föremålet kommer att bestämma vilken metod för rivning som ter sig mest lämplig. En del av stålföremålen rivs bäst genom att man monterar ned dem på samma sätt som de en gång sattes upp, till exempel trappor och gallerdurkar. Fördelarna med att montera ned dessa delar är att det både kan vara tidsbesparande och att det inte uppstår något sekundärt avfall i form av exempelvis metallspån från kapningen.

I de fall då ytkontaminering förekommer på ståldetaljerna förbehandlas ytorna genom att man sprayar på en beläggning. Denna håller kvar kontaminationen för att undvika att den sprids i luften vid kapning.

Ventilationstrummor

Kontaminerade trummor kommer att spraybehandlas för att ge dem en beläggning som håller kvar ytkontamination. Sedan monteras trummorna ned genom att man tar ur bultar och nitar. Ventilationstrummorna kommer att plattas till innan de paketeras. De kommer endast att kapas i de fall då geometrin inte tillåter att de transporteras i transportbehållare utan föregående kapning.

Kablage

Speciella kapar kommer att användas för att kapa ner kablaget till lämplig storlek. Eftersom det finns ett stort materialvärde i kablage kommer mycket av det att gå till återvinning. Även kablage i anläggningsdelar med hög kontamination kan till stor del återvinnas efter att det skyddande plasthöljet har avlägsnats från kopparledningarna.

Betongytor

I ett flertal utrymmen inom anläggningen kommer betongen att vara ytkontaminerad, och i vissa fall kan kontamination ha trängt in i betongen. Ytan på betongen måste då avlägsnas och föras till ett slutförvar. Det är generellt sett mycket svårt att rengöra betongytor som är ytkontaminerade. I tidigare rivningsprojekt har en teknik tillämpats där man tar bort ytan på betongen till ett sådant djup att den betong som är kvar inte är aktiv. Kvarvarande betong kan då rivas på ett konventionellt sätt. Under rivningsskedet kommer två huvudkategorier av tekniker för att ta bort betongytan att behöva tillämpas:

- Tekniker för att avlägsna en kontaminerad yta på betongen så att en ren yta framträder.
- Tekniker för att ta bort huvuddelen av betongen, till exempel i de fall då kontaminationen har trängt så djupt in i betongen att hela eller stora delar av betongvolymen måste tas bort.

Byggnadsrivning

I studien förutsätts att alla byggnadsdelar, kontaminerade som icke-kontaminerade, rivs med liknande teknik. Kontaminerade byggnader och byggnadsdelar kommer först att rengöras, varefter de rivs med konventionella rivningsmetoder.

Det återvinningsbara material som är lätt att avlägsna monteras ned i ett tidigt skede. Betongbyggnaderna kommer att rivas på konventionellt vis. Delar av den krossade betongen kommer att användas för att återfylla de utrymmen som ligger under marknivå.

De byggnader som byggts med stålramverk kommer till stor del att kunna återvinnas. Rivningen kommer huvudsakligen att genomföras med mobilkranar, grävskopor och skärbränning eller mekanisk kapning.

Byggnadsrivning med dynamit kan vara det säkraste sättet att riva de högsta byggnaderna. Eventuellt kan metoden inte tillämpas på grund av närliggande byggnader.

40.2.4 Doser till rivningspersonal

På uppdrag av SKB har TLG genomfört en studie av doser till personal vid rivning av ett kärnkraftverk. TLG Services Inc. har varit involverad i avvecklingsplaneringen för ett flertal kärnkraftverk i USA. De har dessutom varit med och arbetat med dekontaminering och fysisk rivning vid tre olika reaktorer i USA. Deras erfarenheterna från USA har överförts till svenska förhållanden. Anläggningsdata har hämtats från Barsebäck avseende layout, aktivitetsinnehåll och dosrater. TLG:s studie är baserad på mer empiriska data än vad andra företag kan erbjuda.

Studien har som utgångspunkt gjort antagandet att Barsebäck 1 har varit avställd i cirka 20 år när rivningen börjar. Motsvarande avställningstid för Barsebäck 2 är ansatt till cirka 16 år. Den radiologiska kartläggning som genomförts för block 1 har generellt ansetts gälla även för block 2, med korrigering för olika avklingningstider.

Angreppssättet i studien har varit att doser till personal kan uppstå i åtta olika moment under rivningsfasen, vilka är:

1. Nedmontering av komponenter.
2. Nedmontering och segmentering av interna delar och reaktortank.
3. Rivning av den biologiska skärmen.
4. Rivning av bränslebassängernas lining.
5. Dekontaminering av betongytor.
6. Allmänt arbetstillträde till aktiva områden (denna fas är relaterad till komponentrivning).
7. Avfallshantering.
8. Projektledning och övervakning. Doser i denna fas kommer främst från ronder och inspektioner av rivningsarbetet.

Summering av stråldoser till personal

Baserat på erfarenheter från rivning av kärnkraftverk i USA och data från Barsebäck uppskattas den totala stråldosen till rivningspersonalen bli mellan 2 och 3 man-Sv om kraftverket varit avställt en lång tid (15–20 år) och rivningen genomförs med dagens teknik. Genomförs rivningen efter en kortare avställning blir stråldoserna högre, något som kan kompenseras med dekontaminering av systemytor före rivningen. I SKB:s tidiga rivningsstudier med begränsad tillgång till erfarenhetsvärden uppskattades stråldosen till över 12 man-Sv.

Referenser

Kapitel 1

- 1-1 **SKB, 2004.** Fud-Program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-2 **SKB, 2006.** Ansökansplan för inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-06-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-3 **SKI, SSI 2007.** Statens ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle. SKI Rapport 2007:01, Statens kärnkraftinspektion. SSI Rapport 2007:01, Statens strålskyddsinstitut.
- 1-4 **SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I–IV. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- 1-5 **SKB, 1986.** FoU-Program 86. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-6 **SKB, 1986.** FoU-Program 86. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Underlagsrapport till FoU-program 86. Alternativa slutförvaringsmetoder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-7 **SKB, 1989.** FoU-Program 89. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-8 **SKB, 1992.** Fud-Program 92. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling, demonstration och övriga åtgärder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-9 **SKB, 1992.** SKB 91 – Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Bergrundens betydelse för säkerheten. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-10 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-11 **SKB, 1994.** Fud-Program 92 – Kompletterande redovisning. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Komplettering till 1992 års program sammanställd med anledning av regeringsbeslut 1993-12-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-12 **SKB, 1995.** Fud-Program 95. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk förvaring samt forskning, utveckling, demonstration. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-13 **SKB, 1998.** Fud-Program 98. Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling, demonstration av inkapsling och geologisk förvaring. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-14 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport Del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-15 **SKB, 2000.** Fud-K. Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-16 **SKB, 2001.** Fud-Program 2001. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-17 **SKI, 2001.** SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2001. SKI Rapport 02:9, Statens kärnkraftinspektion.
- 1-18 **SKI, 2005.** SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2004. SKI Rapport 2005:31, Statens kärnkraftinspektion.
- 1-19 **SKB, 1989.** WP-Cave – assessment of feasibility, safety and development potential. SKB TR-89-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-20 **Juhlin C, Sandstedt H, 1989.** Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. Part I Geological considerations. Part II Overall facility plan and cost analysis. SKB TR 89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-21 **Sandstedt H, Wichmann C, Pusch R, Börgesson L, Lönnerberg B, 1991.** Storage of nuclear waste in long boreholes. SKB Technical Report TR 91-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-22 **SKB, 1992.** PASS. Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-23 **Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The Very Deep Hole Concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-24 **Ekendahl A-M, Papp T, 1998.** Alternativa metoder. Långsiktigt omhändertagande av kärnbränsleavfall. SKB R-98-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-25 **SKB, 2000.** Systemanalys, Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-26 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-27 **SKB, 2007.** Plan 2007. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 2

- 2-1 **SKB, 2006.** Ansökansplan för inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-06-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-2 **SKI, SSI 2007.** Statens ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle. SKI Rapport 2007:01, Statens kärnkraftinspektion. SSI Rapport 2007:01, Statens strålskyddsinstitut.
- 2-3 **TKS 2006 Posiva Oy, 2006.** TKS-2006, Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants. Program för research development and technical design for 2007–2009.
- 2-4 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Program för kvalificering av tillverkning och förslutning. SKB R-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-5 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning och förslutning. SKB R-06-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-6 **Müller C, Elagin M, Scharmach M, Bellon C, Jaenisch G-R, Bär S, Redmer B, Goebels J, Ewert U, Zscherpel U, Boehm R, Brekow G, Erhard A, Heckel T, Tessaro U, Tschardtke D, Ronneteg U, 2006.** Reliability of nondestructive testing (NDT) of the copper canister seal weld. SKB R-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-7 **Ronneteg U, Cederqvist L, Rydén H, Öberg T, Müller C, 2006.** Reliability in sealing of canister for spent nuclear fuel. SKB R-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-8 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av svetsar. SKB R-06-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2-9 **SKI, 2006.** Utredning av kontrollordning för tillverkning av kapsel för slutförvar av använt kärnbränsle. SKI-Utredningsrapport, SKI 2006/109. Statens kärnkraftinspektion.

Kapitel 3

- 3-1 **SKI, 2004.** Statens kärnkraftinspektionens föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar. SKIFS 2004:1, Statens kärnkraftinspektion.

Kapitel 4

- 4-1 Regeringsbeslut 25, 1996-12-19 (om Fud-program 95).
- 4-2 Regeringsbeslut 22, 2001-11-01 (om Fud-K).
- 4-3 Platsundersökning Forsmark, årsrapport 2006, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-4 Platsundersökning Oskarshamn, årsrapport 2006, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-5 **SKB, 2001.** Program för platsundersökningar vid Forsmark. SKB R-01-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-6 **Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K E, Ericsson L O, 2000.** Vilka krav ställer djupförvaret på berget? Geovetenskapliga lämplighetsfaktorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering. SKB R-00-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-7 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-8 **SKB, 2005.** Program för fortsatta undersökningar av geosfär och biosfär. Platsundersökning Forsmark. SKB R-04-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-9 **SKB, 2004.** Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-10 **SKB, 2005.** Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. Updated 2005-11-09. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-11 **SKB, 2006.** Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. SKB R-06-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-12 **SKB, 2005.** Preliminary safety evaluation for the Forsmark area. Based on data and site descriptions after the initial site investigation state. SKB TR-05-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-13 **SKB, 2006.** Slutförvar för använt kärnbränsle. Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D Forsmark. SKB R-06-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-14 **SKB, 2006.** Prioritering av utformningsalternativ för eventuellt slutförvar i Forsmark. SKB R-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-15 **SKB, 2002.** Geovetenskapligt program för platsundersökningar vid Simpevarp. SKB R-01-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-16 **SKB, 2003.** Prioritering av områden för platsundersökningen i Oskarshamn. SKB R-03-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-17 **SKB, 2007.** Prioritering av platsen för ett slutförvar i Oskarshamn. SKB R-07-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-18 **SKB, 2004.** Program för fortsatta undersökningar av berggrund, mark och vatten. Platsundersökning i Oskarshamn. SKB P-04-300, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-19 **SKB, 2005.** Program för fortsatta undersökningar av berggrund, mark, vatten och miljö inom delområde Laxemar. Platsundersökning Oskarshamn. SKB R-05-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 4-20 **SKB, 2005.** Preliminary site description. Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-21 **SKB, 2006.** Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-22 **SKB, 2005.** Preliminary safety evaluation for the Simpevarp subarea. Based on data and site descriptions after the initial site investigation state. SKB TR-05-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-23 **SKB, 2006.** Preliminary safety evaluation for the Laxemar subarea. Based on data and site descriptions after the initial site investigation state. SKB TR-06-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-24 **SKB, 2006.** Preliminary site description Laxemar stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. SKB R-06-110, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-25 **SKB, 2006.** Slutförvar för använt kärnbränsle. Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D. Oskarshamn, delområde Laxemar. SKB R-06-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-26 **SKB, 2003.** Utredning rörande tillträdesvägar till djupförvarets deponeringsområden, schakt eller ramp? SKB R-03-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-27 **SKB, 2000.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret. SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-28 **Andersson J, Berglund J, Follin S, Hakami E, Halvarson J, Hermanson J, Laaksoharju M, Rhén I, Wahlgren C-H, 2002.** Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-29 **SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet (Fud-K). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-30 **Andersson J, Munier R, Ström A, Söderbäck B, Almén K-E, Olsson L, 2004.** When is there sufficient information from the Site Investigations? SKB R-04-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-31 **Johansson R, 2006.** Lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle. En översikt av trettio års arbete. SKB R-06-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4-32 **McEwen T, Äikäs T, 2000.** The site selection process for a spent fuel repository in Finland – Summary report. Posiva 2000-15, Posiva Oy.

Kapitel 5

- 5-1 **Plan 2007.** Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. 2007. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 6

- 6-1 **SKIFS 2002:1.** Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall. Statens kärnkraftinspektions författningssamling.
- 6-2 **SKIFS 2004:1.** Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Statens kärnkraftinspektions författningssamling.
- 6-3 **CEN, the European Committee for Standardization.** EN 1997-1. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.
- 6-4 **SKB, 2004.** Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-5 **SKB, 2001.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E. Rak ramp med två driftområden. SKB R-01-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-6 **SKB, 2002.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E Spiralramp med ett driftområde. SKB R-02-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-7 **SKB, 2002.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E Schaktalternativ med ett driftområde. SKB R-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-8 **Brantberger M, Zetterqvist A, Arnbjerg-Nielsen T, Olsson T, Outters N, Syrjänen P, 2006.** Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Forsmark, Layout D1. SKB R-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-9 **SKB, 2006.** Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Simpevarp, Layout D1. SKB R-06-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-10 **Janson T, Magnusson J, Bergvall M, Olsson R, Cuisiat F, Skurtveit E, Grimstad E, 2006.** Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Laxemar, Layout D1. SKB R-06-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-11 **SKB, 2006.** Slutförvar för använt kärnbränsle. Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D. Oskarshamn, delområde Simpevarp. SKB R-06-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-12 **SKB, 2006.** Slutförvar för använt kärnbränsle. Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D. Oskarshamn, delområde Laxemar. SKB R-06-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-13 **SKB, 2006.** Slutförvar för använt kärnbränsle. Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D Forsmark. SKB R-06-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 6-14 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-15 **Grimstad E, Barton N, 1993.** Updating of the Q-system for NMT, proc. of the int. symp. on sprayed concrete – Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes, 1993, eds. Kompen, Opsahl and Berg, Norwegian Concrete Association, Oslo.
- 6-16 **Holmberg M, Stille H, 2007.** Observationsmetodens grunder och dess tillämpning på design av konstruktioner i berg. SveBeFo Rapport 80, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- 6-17 **SKIFS 2005:1.** Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om fysiskt skydd av kärntekniska anläggningar. Statens kärnkraftinspektions författningssamling.

Kapitel 7

- 7-1 **Regeringens proposition 1997/98:90.** Följdlagstiftning till miljöbalken m.m.

Kapitel 11

- 11-1 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-2 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Program för kvalificering av tillverkning och förslutning. SKB R-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 12

- 12-1 **SKB, 2000.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret. SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-2 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-3 **Almén K-E, Stenberg L, 2005.** Äspö hard rock laboratory. Characterisation methods and instruments. Experiences from the construction phase. SKB TR-05-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-4 **Claesson L-Å, Nilsson G, 2005.** Drilling of the telescopic borehole KFM06A and the core drilled borehole KFM06B at drill site DS6. Forsmark site investigation. SKB P-05-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-5 **Magnor B, Hardenby C, Kempainen K, Eng A, 2006.** Rock Characterisation System – RoCS. Final report – feasibility study, phase I. State-of-the-art in 3D surveying technology. SKB IPR-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-6 **Martin D, 2007.** Quantifying the in-situ stress magnitudes and orientations for Forsmark Design Step D2. SKB R-07-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-7 **Sundberg J, Back P-E, Ericsson L O, Wrafter J, 2007.** A method for estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. Submitted to International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier.
- 12-8 **Sundberg J, Back P-E, Hellström G, 2005.** Scale dependence and estimation of rock thermal conductivity. Analysis of upscaling, inverse thermal modelling and value of information with the Äspö HRL prototype repository as an example. SKB R-05-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-9 **Forsmark T, Rhén I, Andersson C, 2001.** Prototype Repository. Hydrogeology – Injection test campaign 2, flow measurement of DA3575G01, groundwater salinity, groundwater leakage into G-, I- and J-tunnels. SKB IPR 01-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-10 **Banwart S, Gustafsson E, Laaksoharju M, Nilsson A-C, Tullborg E-L, Wallin B, 1994.** Large-scale intrusion of shallow water into a vertical fracture zone in crystalline bedrock: initial hydrochemical perturbation during tunnel construction at the Äspö Hard Rock Laboratory, southeastern Sweden. Water Resour. Res. 30: 1747-1763.
- 12-11 **Puigdomenech I, Kotelnikova S, Pedersen K, Tullborg E-L, 2000.** In-Situ determination of O₂ uptake by geologic media: Field data for the redox experiment in detailed scale (REX). SKB IPR-00-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-12 **Eriksson M, Stille H, 2005.** Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo Rapport K22. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm.
- 12-13 **Emmelin A, Brantberger M, Eriksson M, Gustafson G, Stille H, 2007.** Rock grouting – Current competence and development for the final repository. SKB R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-14 **Emmelin A, Eriksson M, Fransson Å, 2004.** Characterisation design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL. SKB R-04-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-15 **Fransson Å, 2004.** Development and verification of methods to estimate transmissivity distribution and orientation of conductive fractures/features along boreholes. SKB R-04-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-16 **Funchag J, 2007.** Grouting of fractured rock with silica sol, Grouting design based on penetration length. Doktorsavhandling, GeoEngineering, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- 12-17 **Gustafson G, Stille H, 2005.** Stop Criteria for Cement Grouting. Felsbau Rock and Soil Engineering, No. 3, pp. 62-68.

- 12-18 **Kobayashi S, Stille H, 2007.** Design for rock grouting based on analysis of grout penetration. Verification using Äspö HRL data and parameter analysis. SKB R-07-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-19 **Bodén A, Sievänen U, 2005.** Low-pH injection grout for deep repositories – Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). SKB R-05-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-20 **Butron C, Axelsson M, Gustafson G, 2007.** Silica sol for rock grouting – Tests on mechanical properties. GeoEngineering, Chalmers. Publ. 2007:6 Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. ISSN 1662-9162.
- 12-21 **Eklund D, 2005.** Penetrability of cementitious injection grouts. Ph.D. thesis. Division of Soil and Rock Mechanics. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- 12-22 **Gustafson G, Fransson Å, Axelsson M, Funehag J, 2007 (i prep.).** Grouting strategies – Requirements on grout strength and rheology. GeoEngineering. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- 12-23 **Chang Y, Swindel R, Bogdanoff I, Lindström B, Termén J, Starsec P, 2005.** Study of tunnelling through water-bearing fracture zones – Baseline study on technical issues with NE-1 as reference. SKB R-05-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-24 **Fransson Å, Gustafson G, 2006.** Postexcavation grouting: Inflow prognosis and design – suggested analyses, SveBeFo, Rapport 75. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm. ISSN 1104-1773.
- 12-25 **Posiva, 2006.** TKS-2006, Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants. Program for research development and technical design for 2007–2009. Posiva Oy.
- 12-26 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-27 **Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997.** Zedex – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR 97-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-28 **Olsson M, Niklasson B, Wilson L, Andersson C, 2004.** Äspö HRL. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB R-04-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-29 **Andersson C, 2007.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. SKB TR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-30 **Eurokod 7, 2004.** Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler. SS-EN 1997-1. SIS, Swedish Standards Institute.
- 12-31 **Vägverket, 2004.** ATB Tunnel 2004 – Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av tunnlar. Vägverket publikation 2004:124. ISSN 1401-9612.
- 12-32 **Esdred, 2004.** EU-projektet Esdred (Engineering Studies and Demonstrations of Repository – Module #4: Temporary Sealing (using low pH cement) Technology for construction of sealing plugs and for rock support using shotcrete techniques Designs). Contract Number: FI6W-CT-2004-508851. European Commission.
- 12-33 **Esdred, 2004.** Low-pH shotcrete for rock support. Report on full scale demonstration. Module #4 – Workpackage 3.2 – Deliverable 8.2. Contract Number: FI6W-CT-2004-508851. European Commission.
- 12-34 **Andersson C, Johansson Å, 2002.** Boring of full scale deposition holes at the Äspö Hard Rock Laboratory. Operational experiences including boring performance and a work time analysis. SKB TR-02-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-35 **Autio J, Kirkkomäki T, 1996.** Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring method. SKB TR 96-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-36 **Bäckblom G, Lindgren E, 2005.** KBS-3H – Excavation of two horizontal drifts at the Äspö Hard Rock Laboratory during year 2004–2005. SKB R-05-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 13

- 13-1 **Johannesson L-E, 2002.** Manufacturing of bentonite buffer for Prototype Repository. SKB IPR-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-2 **Johannesson L-E, Nord S, Pusch R, Sjöblom R, 2000.** Isostatic compaction of beaker shaped bentonite blocks on the scale 1:4. SKB TR-00-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-3 **Birgersson M, Johannesson L-E, 2007.** Prototype Repository – Statistical evaluation of buffer density. SKB IPR-06-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-4 **Thorsager P, Börgesson L, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Canister Retrieval Test. Report on installation. SKB IPR-02-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-5 **Börgesson L, Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, 2000.** Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill and instruments in Section I. SKB IPR-02-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 13-6 **Johannesson L-E, Gunnarsson D, Sandén T, Börgesson L, 2004.** Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. D15 & D17. SKB IPR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 14

- 14-1 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Svetsning vid tillverkning och förslutning. SKB R-06-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-2 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Program för kvalificering av tillverkning och förslutning. SKB R-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-3 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Konstruktionsförutsättningar. SKB R-06-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-4 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning och förslutning. SKB R-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-5 **SKI, 2006.** Utredning av kontrollordning för tillverkning av kapsel för slutförvar av använt kärnbränsle. SKI-Utredningsrapport, SKI 2006/109. Statens kärnkraftinspektion.
- 14-6 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning av kapselkomponenter. SKB R-06-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-7 **Andersson C-G, 2005.** Utveckling av gjutna insatser i segjärn. SKB R-05-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-8 **Andersson C-G, Andersson M, Erixon B, Björkegren L-E, Dillström P, Minnebo P, Nilsson K-F, Nilsson F, 2005.** Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report. SKB TR-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-9 **Nilsson K-F, Lofaj F, Burström M, Andersson C-G, 2005.** Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. SKB TR-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-10 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av kapselkomponenter. SKB R-06-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-11 **Andersson C-G, Eriksson P, Westman M, Emilsson G, 2004.** Lägesrapport kapseltillverkning. SKB R-04-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-12 **Stepinski T (editor), Lingvall F, Wennerström E, Wu P, 2006.** Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound. Synthetic aperture imaging, evaluation of ultrasonic attenuation in copper. SKB TR-06-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-13 **Ronneteg U, Cederqvist L, Rydén H, Öberg T, Müller C, 2006.** Reliability in sealing of canister for spent nuclear fuel. SKB R-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-14 **Claesson S, 2005.** Tensile test on copper material for encapsulation of nuclear waste, summary report SKB 1045935, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-15 **Andersson H C M, Seitisleam F, Sandström R, 2005.** Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 and 175°C. SKB TR-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-16 **Andersson H C M, Seitisleam F, Sandström R, 2007.** Creep testing and loading experiments on friction stir welds in copper at 75°C. SKB TR-07-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-17 **Gubner R, Andersson U, Linder M, Nazarov A, Taxén C, 2006.** Grain boundary corrosion of copper canister weld material. SKB TR-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-18 **Gubner R, Andersson U, 2007.** Corrosion resistance of copper canister weld material. SKB TR-07-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-19 **Jaensson B, 2005.** X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. TEK04-0643, CSM Materialteknik AB.
- 14-20 **Jaensson B, 2005.** X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. TEK05-0226, CSM Materialteknik AB.
- 14-21 **Salonen T, 2004.** Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Encapsulation Technology, Memo, Posiva Oy.
- 14-22 **Samuelsson K-G, 2006.** Kemiska analyser av svets i FSW-prover. Bodycote Materials Testing AB provningsrapport PRO06-1139.
- 14-23 **Öberg T, 2006.** Prediction of future production quality with friction stir welding (FSW). Tomas Öberg Konsult AB rapport PM-2006/8a.
- 14-24 **Werme L, 1998.** Design premises for canister for spent nuclear fuel. SKB TR-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-25 **Håkansson B, 2004.** Undersökning av svetsprover. TEK04-509, CSM Materialteknik AB.
- 14-26 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av svetsar. SKB R-06-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-27 **Müller C, Elagin M, Scharmach M, Bellon C, Jaenisch G-R, Bär S, Redmer B, Goebbels J, Ewert U, Zscherpel U, Boehm R, Brekow G, Erhard A, Heckel T, Tessaro U, Tschardt D, Ronneteg U, 2006.** Reliability of nondestructive testing (NDT) of the copper canister seal weld. SKB R-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 14-28 **Müller C, Öberg T, 2004.** Strategy for verification and demonstration of the sealing process for canisters for spent fuel. SKB R-04-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-29 **Broman U, Dybeck P, Ekendahl A-M, 2005.** Transport av inkapslat bränsle. SKB R-05-65, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-30 **IAEA, 2005.** Regulations for the safe transport of radioactive material. 2005 Edition. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Kapitel 15

- 15-1 **Gunnarsson D, Börgesson L, Hökmark H, Johannesson L-E, Sandén T, 2001.** Report on the installation of the Backfill and Plug test. Detailed design of lead-throughs. SKB IPR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-2 **Gunnarsson D, 2002.** Backfill production for the Prototype Repository. SKB IPR-02-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-3 **Börgesson L, Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill and instruments in Section I. SKB IPR-02-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-4 **Johannesson L-E, Gunnarsson D, Sandén T, Börgesson L, 2004.** Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. D15 & D17. SKB IPR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-5 **Gunnarsson D, Börgesson L, Keto P, Tolppanen P, Hansen J, 2004.** Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. SKB R-04-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-6 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-7 **Johannesson L E, Nilsson U, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB R-06-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-8 **Gunnarsson D, Morén L, Sellin P, Keto P, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Assessment of backfill materials and methods for deposition tunnels. SKB R-06-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-9 **Bodén A, Sievänen U, 2005.** Low-pH injection grout for deep repositories – Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). SKB R-05-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-10 **Chandler N, Cournot A, Dixon D, Fairhurst C, Hansen F, Gray M, Hara K, Ishijima Y, Kozak E, Martino J, Masumoto K, McCrank G, Sugita Y, Thompson P, Tillerson J, Vignal B, 2002.** The five year report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727.

Kapitel 16

- 16-1 **Gunnarsson D, Börgesson L, Hökmark H, Johannesson L-E, Sandén T, 2001.** Report on the installation of the Backfill and Plug test. Detailed design of lead-throughs. SKB IPR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-2 **Gunnarsson D, Börgesson L, Keto P, Tolppanen P, Hansen J, 2004.** Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. SKB R-04-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-3 **Gunnarsson D, Morén L, Sellin P, Keto P, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Assessment of backfill materials and methods for deposition tunnels. SKB R-06-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-4 **Pusch R, Ramqvist G, 2006.** Cleaning and sealing of borehole. Report of Sub-project 1 on design and modelling of the performance of borehole plugs. SKB IPR-06-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-5 **Pusch R, Ramqvist G, 2006.** Cleaning and sealing of borehole. Report of Sub-project 2 on plugging of 5 m boreholes at Äspö. SKB IPR-06-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-6 **Pusch R, Ramqvist G, 2007.** Cleaning and sealing of borehole. Report of Sub-project 3 on plugging of borehole OL-KR24 at Olkiluoto and reference boreholes at Äspö. SKB IPR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-7 **Pusch R, Ramqvist G, 2007.** Cleaning and sealing of borehole. Report of Sub-project 4 on sealing of 200 mm diameter holes. SKB IPR-06-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-8 **Pusch R, Ramqvist G, 2004.** Borehole sealing, preparative steps, design and function of plugs-basic concept. SKB IPR-04-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-9 **Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G, 1987.** Final report on the borehole, shaft and tunnel sealing test – Volume I: bore hole plugging. Stripa Project TR 87-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-10 **Rautio T, 2006.** Borehole plugging experiment in OL-KR24 at Olkiluoto, Finland. Working Report 2006-35, Posiva Oy.

Kapitel 17

- 17-1 **Kalbantner P, Sjöblom R, 2000.** Techniques for freeing deposited canisters. SKB TR-00-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-2 **Thorsager P, Börjesson L, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Canister Retrieval Test. Report on installation. SKB IPR-02-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-3 **SKB, 2007.** Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2006. SKB TR-07-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 18

- 18-1 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-2 **Sandstedt H, Pers K, Birgersson L, Ageskog L, Munier R, 2001.** Project JADE Comparison of repository systems. Executive summary of results. SKB TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-3 **SKB, 2001.** Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering. SKB R-01-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-4 **Börjesson L, Sandén T, Fälth B, Åkesson M, Lindgren E, 2005.** Studies of buffers behaviour in KBS-3H concept. Work during 2002–2004. SKB R-05-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-5 **Thorsager P, Lindgren E, 2004.** KBS-3H Summary report of work done during basic design. SKB R-04-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-6 **Bäckblom G, Lindgren E, 2005.** KBS-3H – Excavation of two horizontal drifts at the Äspö Hard Rock Laboratory during year 2004–2005. SKB R-05-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-7 **Snellman M, 2004.** Expert review of the KBS-3H design and the preliminary safety assessment. R&D Report 2004-02. Posiva Oy.

Kapitel 19

- 19-1 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-2 **SKB, 2006.** Ansökansplanen för inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-06-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 20

- 20-1 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-2 **SKB, 2007.** Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar – en första värdering. Förenklad svensk sammanfattning av säkerhetsanalysen SR-Can. SKB R-07-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-3 **SKB, 2005.** Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. Updated 2005-11-09. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-4 **SKB, 2006.** Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-5 **Brantberger M, Zetterqvist A, Arnbjerg-Nielsen T, Olsson T, Outters N, Syrjänen P, 2006.** Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Forsmark, Layout D1. SKB R-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-6 **Janson T, Magnusson J, Bergvall M, Olsson R, Cuisiat F, Skurtveit E, Grimstad E, 2006.** Final repository for spent nuclear fuel. Underground design Laxemar Layout D1. SKB R-06-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-7 **SKB, 2006.** Model summary report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-8 **SKB, 2004.** Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnbränsleavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-9 **Hedin A, 2004.** Integrated near-field evolution model for a KBS-3 repository. SKB R-04-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 21

- 21-1 **SKB, 2006.** FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-2 **Lokrantz H, Sohlenius G, 2006.** Ice marginal fluctuations during the Weichselian glaciation in Fennoscandia, a literature review. SKB TR-06-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-3 **SKB, 2006.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 21-4 **Fastook J L, 1994.** Modelling the Ice Age: The Finite-Element Method in Glaciology. Computational Science and Engineering 1(1), pp 55–67.
- 21-5 **Fastook J L, Holmlund P, 1994.** A glaciological model of the Younger Dryas event in Scandinavia. Journal of Glaciology 40(134), pp 125–131.
- 21-6 **Fastook J L, Prentice M, 1994.** A finite-element model of Antarctica: sensitivity test for meteorological mass-balance relationship. Journal of Glaciology 40(134), p 167.
- 21-7 **Payne A J, Huybrechts Ph, Abe-Ouchi A, Calov R, Fastook J L, Greve R, Marshall S J, Marsiat I, Ritz C, Tarasov L, Thomassen M P A, 2000.** Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling. Journal of Glaciology, 46(153), pp 227–238.
- 21-8 **Näslund J O, Jansson P, Fastook J L, Johnson J, Andresson L, 2005.** Detailed spatially distributed geothermal heat flow data for modelling of basal temperatures and melt water production beneath the Fennoscandian ice sheet. Annals of Glaciology, Vol 40, pp 95–101.
- 21-9 **Waddington E D, 1987.** Geothermal heat flux beneath ice sheets. In: E.D. Waddington, & J.S. Walder (Eds.): The physical basis of ice sheet modelling. International Association of Hydrological Research (IAHS) publication 170:217–226.
- 21-10 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-11 **Jansson P, Näslund J O, Rodhe L, 2006.** Glacial hydrology and eskers. A review of ice sheet hydrology. SKB TR-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-12 **Jaquet O, Pascal S, 2006.** regional ground water flow for a glaciation senario. Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-06-100, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-13 **Westman P, Wastegård S, Schoning K, Gustavsson B, Omstedt A, 1999.** Salinity changes in the Baltic Sea during the last 8,500 years: evidence, causes and models. SKB TR-99-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-14 **Milne G A, 1998.** Refining models of the glacial isostatic adjustment process. Ph. D. Thesis, University of Toronto, Toronto.
- 21-15 **Milne G A, Mitrovica J X, 1998.** Postglacial sea-level change on a rotating Earth. Geophysical Journal International 133, pp 1–10.
- 21-16 **Mitrovica J X, Milne G A, 2003.** On post-glacial sea level: I. General theory. Geophysical Journal International 154, pp 253–267.
- 21-17 **Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-18 **Påsse T, Andersson L, 2005.** Shore-level displacement in Fennoscandia calculated from empirical data. Geologiska Föreningens Förhandlingar 127(4), pp 253–268.
- 21-19 **Whitehouse P, Latychev K, Milne G A, Mitrovica J X, Kendall K, 2006.** Impact of 3D Earth structure on Fennoscandian glacial isostatic adjustment: Implications for space-geodetic estimates of present-day crustal deformations. Geophysical Research Letters 33, L13502, doi:10.1029/2006GL026568.
- 21-20 **Whitehouse P L, Latychev K, Milne G A, Mitrovica J X, Tromp J, 2006.** The influence of lateral earth structure on predictions of glacial isostatic adjustment and sea level change in Fennoscandia. International Symposium “Sea Level Changes: Records, Processes and Modeling”, Giens (France) – September 25–29, 2006.
- 21-21 **IPCC, 2001.** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- 21-22 **Hartikainen J, 2004.** Permafrost modeling in DECOVALEX III for BMT3. In Eloranta E ed., DECOVALEX III, 1999–2003. An international project for the modelling of coupled Thermo-Hydro-Mechanical processes for spent fuel disposal. Finnish national contributions. STUK-YTO-TR 209, Helsinki, Finland.
- 21-23 **Vidstrand P, Svensson U, Follin S, 2006.** Simulation of hydrodynamic effects of salt rejection due to permafrost. Hydrogeological numerical model of density-driven mixing, at regional scale, due to a high salinity pulse. SKB, R-06-101, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-24 **Hohl V, 2005.** Northern European long term climate archives. SKB TR-05-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-25 **Moberg A, Gouirand I, Wohlfarth B, Schoning K, Kjellström E, Rummukainen M, de Jong R, Linderholm H, Zorita E, 2006.** Climate in Sweden during the past millennium – Evidence from proxy data, instrumental data and model simulations. SKB TR-06-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-26 **Gouirand I, Moberg A, Zorita E, 2006.** Climate variability in Scandinavia for the past millennium simulated by an atmosphere-ocean general circulation model. Tellus (2006), pp 1–20.
- 21-27 **BIOCLIM, 2003.** Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000 km scale), Deliverable D7. Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy p 88.

- 21-28 **ACIA, 2005.** Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge. 1042 p.
 21-29 **Thorne M C, Kane P, 2006.** Climate and Landscape Change within Tools for Optioneering of Remediation and Decommissioning Solutions. Report to Nexia Solutions Ltd. MTA/P0013/2006-1: Issue 2. Mike Thorne and Associates Limited.

Kapitel 22

- 22-1 **SKB, 2007.** Plan 2007. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-2 **Håkansson R, 1999.** Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB R-99-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-3 **SKB, 2006.** Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-4 **Werme L O, Johnson L H, Oversby V M, King F, Spahiu K, Grambow B, Shoesmith D W, 2004.** Spent fuel performance under repository conditions: A model for use in SR-Can. SKB TR 04-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-5 **Lovera P, Ferry C, Poinsot C, Johnson L, 2003.** Synthesis report on the relevant diffusion coefficients of fission products and helium in spent nuclear fuels. CEA Report, CEA-R-6039, CEA, France.
- 22-6 **Van Brutzel L, Crocombette J-P, 2007.** Atomic scale modelling of the primary damage state of irradiated UO₂ matrix. Mater. Res. Symp. Proc. 98IE, 0981-JJ01-01.
- 22-7 **Guenther R J, Blahnik D E, Jenquin U P, Mendel J E, Thomas L E, Thornhill C K, 1991.** Characterization of spent fuel approved testing material – ATM-104. PNL Report, PNL-5109-104, PNL, USA.
- 22-8 **Smart N R, Rance A P, 2005.** Effect of radiation on anaerobic corrosion of iron. SKB TR-05-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-9 **Forsyth R, 1997.** The SKB Spent Fuel Corrosion Programme. An evaluation of results from the experimental programme performed in the Studsvik Hot Cell laboratory. SKB TR 97-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-10 **Poinsot C, Ferry C, B. Grambow B, Kelm M, Spahiu K, Martinez A, Johnson L, Cera E, de Pablo J, Quinones J, Wegen D, Lemmens K, McMnamin T, 2006.** Mechanisms governing the release of radionuclides from spent nuclear fuel in geological repository: major outcomes of the European Project SFS. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 932, pp 421–432.
- 22-11 **Rondinella V V, Cobos J, Wiss T, 2004.** Leaching Behaviour of Low-Activity Alpha-Doped UO₂. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 824, pp 167-173.
- 22-12 **Jegou C, Broudic V, Poulesquen A, Bart J M, 2004.** Effects of α and γ radiolysis of water on alteration of the spent UO₂ nuclear fuel matrix, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 391–396.
- 22-13 **Cachoir C, Glatz J-P, Grambow B, Lemmens K, Martínez-Esparza A, Mennecart T, Rondinella V, Spahiu K, Wegen D, 2005.** Effect of alpha irradiation field on long term corrosion rates of spent fuel. ITU Report, 2005.
- 22-14 **Carbol P, Cobos-Sabate J, Glatz J-P, Grambow B, Kienzler B, Loida A, Martinez Esparza A, Metz V, Quiñones J, Ronchi C, Rondinella V, Spahiu K, Wegen D, Wiss T, 2005.** The effect of dissolved hydrogen on the dissolution of ²³³U doped UO₂(s), high burnup spent fuel and MOX fuel. SKB TR 05-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-15 **Cera E, Bruno J, Duro L, Eriksen T, 2006.** Experimental determination and chemical modelling of radiolytic processes at the spent fuel/water interface. Long contact time experiments. SKB TR-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-16 **Ollila K, Oversby V M, 2005.** Dissolution of unirradiated UO₂ and UO₂ doped with ²³³U under reducing conditions. SKB TR-05-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-17 **Ollila K, Oversby V M, 2006.** Testing of uranium dioxide enriched with ²³³U under reducing conditions. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 932, pp 441–448.
- 22-18 **Sunder S, Boyer G D, Miller N H, 1990.** XPS studies of UO₂ oxidation by alpha radiolysis of water at 100°C. Journal of Nuclear Materials, 175, pp 163–169.
- 22-19 **King F, Shoesmith D, 2004.** Electrochemical studies of the effect of H₂ on UO₂ dissolution. SKB TR-04-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-20 **Jonsson M, Ekeröth E, Roth O, 2004.** Dissolution of UO₂ by one- and two-electron oxidants. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 77–82.
- 22-21 **Hossain M M, Ekeröth E, Jonsson M, 2006.** Effects of HCO₃⁻ on the kinetics of UO₂ oxidation by H₂O₂. Journal of Nuclear Materials 358, pp 202–208.
- 22-22 **Ekeröth E, Jonsson M, Eriksen T E, Ljungqvist K, Kovács S, Puigdomenech I, 2004.** Inhibition of spent nuclear fuel (UO₂) dissolution by H₂. Journal of Nuclear Materials 334, 35–39.
- 22-23 **Roth O, Nilsson S, Jonsson M, 2006.** Radiation enhanced reactivity of UO₂. Journal of Nuclear Materials 354, pp 131–136.

- 22-24 **Roth O, Bönneberg T, Jonsson M, 2006.** The influence of particle size on the kinetics of UO₂ oxidation in aqueous powder suspensions. *Journal of Nuclear Materials* 353, pp 75–79.
- 22-25 **Ekeröth E, Roth O, Jonsson M, 2006.** The relative impact of radiolysis products in radiation induced oxidative dissolution of UO₂. *Journal of Nuclear Materials* 355, pp 38–46.
- 22-26 **Nielsen F, Jonsson M, 2006.** Geometrical α - and β -dose distributions and production rates of radiolysis products in water in contact with spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials* 359, pp 1–7.
- 22-27 **Nielsen F, Lundahl K, Jonsson M, 2007.** Simulations of H₂O₂ concentration profiles in the water surrounding spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials*. In print.
- 22-28 **Pastina B, LaVerne J A, 2001.** Effect of molecular hydrogen on hydrogen peroxide in water radiolysis. *Journal of Physical Chemistry A*, 105, pp 9316–9322.
- 22-29 **Duro L, Grivé M, Cera E, Gaona X, Domènech C, Bruno J, 2005.** Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can. SKB TR-06-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-30 **Robit V, Poinssot C, Vitorge P, Grambow B, Cui D, Spahiu K, Catalette H, 2006.** Assessment of the relevance of coffinite formation within the near-field environment of spent nuclear fuel geological disposals. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 932, pp 489–496.
- 22-31 **Wersin P, Spahiu K, Cui D, Scheidegger A, Wieland E, 2004.** Joint SKB-Nagra redox-project: Redox processes and immobilisation of radionuclides in the near field of nuclear waste repositories. Arbeitsbericht NAB 04-03, Nagra, Switzerland.
- 22-32 **Cui D, Low J, Lundström M, Spahiu K, 2004.** Spent fuel leaching under anoxic conditions and the effect of canister materials. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 807, pp 89–94.
- 22-33 **Cui D, Rondinella V, Low J, Pan J, Tamborini G, Spahiu K, 2006.** On the behaviour of spent fuel under simulated early canister-failure conditions. *Proceedings of the 11th IHLRWM Conference*, Las Vegas, ANS, pp 925–932.
- 22-34 **Scott T B, Allen G C, Heard P J, Randel M G, 2005.** Reduction of U(VI) to U(IV) on the surface of magnetite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, pp 5639–5646.
- 22-35 **Ferry C, Poinssot C, Cappelaere C, Desgranges L, Jegou C, Miserque F, Piron J P, Roudil D, Gras J M, 2006.** Specific outcomes of the research on the spent fuel long-term evolution in interim dry storage and deep geological disposal. *Journal of Nuclear Materials* 352, pp 246–253.

Kapitel 23

- 23-1 **Ronneteg U, Cederqvist L, Rydén H, Öberg T, Müller Ch, 2006.** Reliability in sealing of canister for spent nuclear fuel. SKB R-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-2 **Lundgren K, 2004.** Final disposal of fuel – electron radiation outside copper canister. SKB TR-04-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-3 **Jaensson B, 2005.** X-ray diffraction measurements of residual stresses in welded copper canister lids. CSM Materialteknik Technical report TEK04-0643.
- 23-4 **Jaensson B, 2005.** Continued X-ray diffraction measurements of residual stresses in welded copper canister lids. CSM Materialteknik Technical report TEK05-0226.
- 23-5 **Salonen T, 2004.** Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Posiva Memo February 4, 2004, Posiva Oy, Finland.
- 23-6 **Andersson C-G, Andersson M, Erixon B, Björkegren L-E, Dillström P, Minnebo Ph, Nilsson K-F, Nilsson F, 2005.** Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report. SKB TR-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-7 **Dillström P, 2005.** Probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel. SKB TR-05-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-8 **Nilsson K-F, Lofaj F, Burström M, Andersson C-G, 2005.** Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. SKB TR-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-9 **Börgesson L, Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Influence of shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage caused to the canister. SKB TR-06-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-10 **Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole when creep is considered – first model. Effect on the canister and the buffer. SKB R-06-87, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-11 **Andersson H, Seitisleam, F, Sandström R, 2005.** Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 and 175°C. SKB TR-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-12 **Sandström R, Wu R, 2007.** Origin of the extra low creep ductility of copper without phosphorus. SKB TR-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-13 **Sandström R, Andersson H C M, 2007.** The effect of phosphorous on creep in copper. *Journal of Nuclear Materials*. In print.
- 23-14 **Henderson P J, Österberg J-O, Ivarsson B, 1992.** Low temperature creep of copper intended for nuclear waste containers. SKB TR-92-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-15 **Sandström R, Andersson H C M, 2007.** Creep in phosphorous alloyed copper during power-law breakdown. *Journal of Nuclear Materials*. In print.
- 23-16 **Smart N R, Rance A P, Fennell P A H, 2006.** Expansion due to the anaerobic corrosion of iron. SKB TR-06-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 23-17 **Smart N R, Adams R, 2006.** Natural analogues for expansion due to the anaerobic corrosion of ferrous materials. SKB TR-06-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-18 **Carlson L, Karnland O, Oversby V M, Rance A P, Smart N R, Snellman M, Vähänen M, Werme L O, 2007.** Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol 32, p 334.
- 23-19 **Carlson L, Karnland O, Olsson S, Rance A, Smart N, 2006.** Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. Posiva Working Report 2006-60, Posiva Oy, Finland.
- 23-20 **Smart N R, Rance A P, Fennell P A H, 2005.** Galvanic corrosion of copper-cast iron couples. SKB TR-05-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-21 **Guinan M W, 2001.** Radiation effects in spent nuclear fuel canisters. SKB TR-01-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-22 **Brissoneau L, Bocquet J-L, 2003.** Radiation effects on the mechanical properties and long term aging of spent fuel storage containers. *Proceedings of ICEM '03*, icem03-4513.
- 23-23 **Brissoneau L, Barbu A, Bocquet J-L, 2004.** Radiation effects on the long-term aging of spent fuel storage containers. *RAMTRANS*, Vol 15, p 121.
- 23-24 **Gubner R, Andersson U, Linder M, Nazarov A, Taxén C, 2006.** Grain boundary corrosion of copper canister weld material. SKB TR-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-25 **Smith J, Qin Z, King F, Werme L, Shoesmith D W, 2007.** Sulfide film formation on copper under electrochemical and natural corrosion conditions. *Corrosion*, Vol 63, p 135.
- 23-26 **Smith J M, Wren J C, Odziemkowski M, Shoesmith D W, 2007.** The electrochemical response of preoxidized copper in aqueous sulfide solutions. *J. Electrochem. Soc.* Vol. 154, C431-C438.
- 23-27 **Masurat P A, 2006.** Potential for corrosion in disposal systems for high level radioactive waste by *Meiothermus* and *Desulfovibrio*. Doctoral Thesis at Department of Cell and Molecular Biology, Microbiology, Göteborgs universitet, Göteborg.
- 23-28 **Kinnunen P, 2006.** Stress corrosion cracking investigation of copper in groundwater with acetate ions. Posiva Working Report 2006-18. Posiva Oy Finland.
- 23-29 **Khanzhin V G, Nikulin S A, 2005.** Assessment of copper resistance to stress-corrosion cracking in nitrite solutions by means of acoustic emission measurements, deformation diagrams, qualitative and quantitative fractography, and non-linear fracture mechanics. SKB TR-05-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 24

- 24-1 **SKB, 2006.** Initial state report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-2 **SKB, 2006.** Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-3 **Karnland O, Olsson S, Nilsson U, Sellin P, 2006.** Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-4 **Meier L P, Kahr G, 1999.** Determination of the Cation Exchange Capacity (CEC) of Clay Minerals using the Complexes of Copper (II) Ion with Triethylenetetramine and Tetraethylenepentamine. *Clays and Clay Minerals* 47, pp 386–388.
- 24-5 **Newman A C D, Brown G, 1987.** *The Chemical Constitution of Clays*, Mineralogical Society Monograph No.6, ed. A.C.D. Newman, 1987.
- 24-6 **Börgesson L, Fredriksson A, Johannesson L-E, 1994.** Heat conductivity of buffer materials. SKB TR-94-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-7 **Hökmark H, Fälth B, 2003.** Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and near-field design on the maximum canister temperature. SKB TR-03-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-8 **Hökmark H, Ledesma A, Lassabatere T, Fälth B, Börgesson L, Robinet J C, Sellali N, Sémété P, 2006.** Modelling heat and moisture transport in the ANDRA/SKB temperature buffer test. In: *Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, Part 2. Physics and Chemistry of the Earth* 32 (2007) 753–766.
- 24-9 **Kristensson O, Hökmark H, 2007.** Thermal 3D modelling of the Prototype Repository. SKB IPR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-10 **Back P-E, Sundberg J, 2007.** Thermal Site Descriptive Model. A strategy for the Model Development during Site Investigations. Version 2.0, SKB R-07-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-11 **Dueck A, 2004.** Hydro-mechanical properties of a water unsaturated sodium bentonite, laboratory study and theoretical interpretation. PhD-thesis, Lund Institute of Technology, Sweden.
- 24-12 **Börgesson L, Fälth B, Hernelind J, 2006.** Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept. Special emphasis given to the influence of the backfill on the wetting of the buffer. SKB TR-06-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-13 **Goudarzi R, Börgesson L, Röshoff K, Edelman M, 2006.** Canister Retrieval Test. Sensors data report (Period 001026–060501). Report No: 12. SKB IPR-06-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 24-14 **Goudarzi R, Åkesson M, Hökmark H, 2006.** Temperature Buffer Test. Sensors data report (Period 030326–060701). Report No: 8. SKB IPR-06-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-15 **Goudarzi R, Johannesson L-E, 2006.** Prototype Repository. Sensors data report (Period 010917–060601). Report No: 15. SKB IPR-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-16 **Åkesson M, 2006.** Temperature Buffer Test. Evaluation modeling – Field test. SKB IPR-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-17 **Åkesson M, 2006.** Temperature Buffer Test. Evaluation modeling – Mock-up test. SKB IPR-06-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-18 **Börgesson L, Sandén T, Fälth B, Åkesson M, Lindgren E, 2006.** Studies of buffer behaviour in KBS-3H concept. Work during 2002–2004. SKB R-05-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-19 **Börgesson L, Sandén T, 2006.** Piping and erosion in buffer and backfill materials. Current knowledge. SKB R-06-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-20 **Börgesson L, Hernelind J, 2006.** Consequences of lost or missing bentonite in a deposition hole. SKB TR-06-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-21 **Johannesson L-E, Nilsson U, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB R-06-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-22 **Börgesson L, Johannesson L-E, 2006.** Consequences of upwards swelling from a wet deposition hole into a dry tunnel with backfill made of blocks. SKB TR-06-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-23 **Börgesson L, Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Influence of shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage caused to the canister. SKB TR-06-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-24 **Börgesson L, Hernelind J, 2006.** Canister displacement in KBS-3V. A theoretical study. SKB TR-06-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-25 **Börgesson L, Sandén T, Johannesson L-E, Knutsson H, 2006.** ROSE, ROck Shear Experiment. A feasibility study. SKB IPR-06-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-26 **Arcos D, Grandia F, Domènech C, 2006.** Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository. SKB TR-06-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-27 **Karland O, Olsson S, Nilsson U, Sellin P, 2006.** Experimentally determined swelling pressures and geochemical interactions of compacted Wyoming bentonite with highly alkaline solutions. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol 32, Issues 1-7 2007, pp 275-286.
- 24-28 **Karland O, Birgersson M, 2006.** Montmorillonite stability – with special respect to KBS-3 conditions. SKB TR-06-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-29 **Carlson L, Karland O, Olsson S, Rance A, Smart N, 2006.** Experimental studies on the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. Posiva Working Report 2006-60, Posiva, Finland.
- 24-30 **Wilson J, Cressey G, Cressey B, Cuadros J, Ragnarsdottir K V, Savage D, Shibata M, 2006.** The effect of iron on montmorillonite stability: (II) Experimental investigation. *Geochimica Cosmochimica Acta*, Vol 70, pp 323–336.
- 24-31 **Anderson D M (ed), 1984.** Smectite alteration. SKB TR 84-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-32 **SKB, 1999.** Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post closure safety. Main Report, Vol I and II. SKB TR-99-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-33 **Motamedi M, Karland O, Pedersen K, 1996.** Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite. *FEMS Microbiol. Letters* 141, pp 83–87.
- 24-34 **Pedersen K, Motamedi M, Karland O, Sandén T, 2000.** Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. *Engineering Geology*, Vol 58, pp 149–161.
- 24-35 **Pedersen K, Motamedi M, Karland O, Sandén T, 2000.** Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. *Journal of Applied Microbiology*, Vol 89, pp 1038–1047.
- 24-36 **Stroes-Gascoyne S, Pedersen K, Haveman S A, Dekeyser K, Arlinger, 1997.** Occurrence and identification of microorganisms in compacted clay-based buffer material designed for use in a nuclear fuel waste disposal vault. *Canadian Journal of Microbiology*, Vol 43, pp 1133–1146.
- 24-37 **Masurat P, 2006.** Thesis 10th March. Potential for corrosion in disposal systems for high level radioactive waste by *Meiothermus* and *Desulfovibrio*. Göteborg University, Göteborg, Sweden.
- 24-38 **Chi Fru E, 2006.** Thesis, 27th October. Molecular characterisation of the microbial diversity in natural and engineered environments. Göteborg University, Göteborg, Sweden.
- 24-39 **Pedersen K, 2005.** The deep intraterrestrial biosphere. In: Gadd, G.M, K.T. Semple and H.M. Lappin-Scott (eds) *Micro-organisms and earth systems – advances in geomicrobiology*, Published for the Society for General Microbiology, Cambridge University Press, Cambridge, pp 233–245.
- 24-40 **Ochs M, Talerico C, 2004.** SR-Can. Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. SKB TR-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 25

- 25-1 **Hökmark H, Ledesma A, Lassabatere T, Fälth B, Börgesson L, Robinet J C, Sellali N, Sémété P, 2006.** Modelling heat and moisture transport in the ANDRA/SKB temperature buffer test. In: Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, Part 2. Physics and Chemistry of the Earth, Vol 32, pp 753–766.
- 25-2 **Börgesson L, Fälth B, Hernelind J, 2006.** Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept. Special emphasis given to the influence of the backfill on the wetting of the buffer. SKB TR-06-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-3 **Johannesson L-E, Nilsson U, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB R-06-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-4 **Börgesson L, Sandén T, 2006.** Deep repository – Engineered barrier systems. Piping and erosion in tunnel backfill. Laboratory tests to understand processes. SKB R-06-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-5 **SKB, 2006.** Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-6 **Vahlund F, Hermansson H, 2006.** Compulink – Implementing the COMP23 model in Simulink. SKB R-06-86, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-7 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-8 **Ochs M, 2006.** SR-Can – Data and uncertainty assessment – Migration parameters for a backfill of Friedland Clay in the KBS-3 concept. SKB R-06-85, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-9 **Ochs M, Talerico C, 2004.** SR-Can. Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. SKB TR-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 26

- 26-1 **Hökmark H, Fälth B, 2003.** Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature. SKB TR-03-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-2 **Sundberg J, 2002.** Determination of thermal properties at Äspö HRL. Comparison and evaluation of methods and methodologies for borehole KA2599 G01. SKB R-02-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-3 **Sundberg J, Kukkonen I, Hälldahl L, 2003.** Comparison of thermal properties measured by different methods. SKB R-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-4 **Sundberg J, 2003.** Thermal site descriptive model. A strategy for the model development during site investigations. Version 1.0. SKB R-03-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-5 **Sundberg J, 2003.** Thermal properties at Äspö HRL. Analysis of distribution and scale factors. SKB R-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-6 **Back P E, Sundberg J, 2007.** Thermal Site Descriptive Model. A Strategy for the model development during site investigations. Version 2.0. SKB R-07-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-7 **Goudarzi R, Johannesson, L-E, 2006.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Sensors Data Report (period 010917–051201) Report No:14. SKB IPR-06-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-8 **Andersson C, 2007.** Äspö Pillar Stability Experiment, Final Report. Rock Mass Response to Coupled Mechanical Thermal Loading. SKB TR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-9 **Sundberg J, Back P-E, Hellström G, 2005.** Scale dependence and estimation of rock thermal conductivity. Analysis of upscaling, inverse thermal modeling and value information with the Äspö HRL prototype repository as an example. SKB R-05-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-10 **Sundberg J, Wrafter J, Back P-E, Ländell M, 2006.** Thermal modelling, Preliminary site description Laxemar subareas – version 1.2. SKB R-06-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-11 **Sundberg J, Back P-E, Ericsson L O, Wrafter J, 2007.** A method for estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. Submitted to International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier.
- 26-12 **Kristensson O, Hökmark H, 2007.** Thermal 3D modelling of the Prototype Repository. SKB IPR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-13 **Kukkonen I, Suppala I, Korpisalo A, Koskinen T, 2005.** TERO Borehole Logging Device and Test Measurements of Rock Thermal Properties in Olkimoto. Posiva 2005-9, Posiva Oy.
- 26-14 **Sundberg J, Back P E, Bengtsson A, Ländell M, 2005.** Thermal modelling. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-15 **Sundberg J, Back P E, Hellström G, 2005.** Scale dependence and estimation of rock thermal conductivity. Analysis of upscaling, inverse thermal modelling and value information with the Äspö HRL prototype repository as an example. SKB R-05-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-16 **Wrafter J, Sundberg J, Ländell M, Back P E, 2006.** Thermal modelling. Site descriptive modelling. Laxemar – stage 2.1. SKB R-06-84, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-17 **SKB, 2005.** Preliminary site-description, Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 26-18 **SKB, 2006.** Preliminary site-description, Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-19 **DHI Software, 2004.** MIKE SHE. An integrated hydrological modelling system. User Guide. DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.
- 26-20 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2005.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Simpevarp 1.2. SKB R-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-21 **Johansson P-O, Werner K, Bosson E, Berglund S, Juston J, 2005.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-22 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2005.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-05-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-23 **Bosson E, Berglund S, 2006.** Near-surface hydrogeological model of Forsmark. Open repository and solute transport applications – Forsmark 1.2. SKB R-06-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-24 **Svensson U, 2006.** The Laxemar and Forsmark repositories. An analysis of the water inflow distribution. SKB R-06-102, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-25 **Svensson U, 2005.** The Forsmark repository – Modelling changes in the flow, pressure and salinity fields, due to a repository for spent nuclear fuel. SKB R-05-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-26 **Svensson U, 2006.** The Laxemar repository – Modelling changes in the flow, pressure and salinity fields, due to a repository for spent nuclear fuel. SKB R-06-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-27 **Bosson E, 2006.** Near-surface hydrogeological model of Laxemar. Open repository – Laxemar 1.2. SKB R-06-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-28 **Hartley L, Hoch A, Jackson P, Joyce S, McCarthy R, Rodwell W, Swift B, Marsic N, 2006.** Groundwater flow and transport modelling during the temperate period for the SR-Can assessment: Forsmark area – version 1.2. SKB R-06-98, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-29 **Hartley L, Hoch A, Jackson P, Joyce S, McCarthy R, Swift B, Gylling B, Marsic N, 2006.** Groundwater flow and transport modelling during the temperate period for the SR-Can assessment: Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-99, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-30 **Jaquet O, Siegel P, 2003.** Groundwater flow and transport modelling during a glaciation period. SKB R-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-31 **Jaquet O, Siegel P, 2006.** Regional groundwater flow model for a glaciation scenario. SR-Can assessment: Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-06-100, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-32 **SKB, 2006.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-33 **Jaquet O, Siegel P, 2004.** Local-scale modelling of density-driven flow for the phases of repository operation and post-closure at Beberg. SKB R-04-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-34 **Painter S, Sun A, 2005.** Representation of an open repository in groundwater flow models. SKB R-05-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-35 **Black J H, Robinson P C, Barker J A, 2006.** A preliminary investigation of the concept of “hyper-convergence” using “sparse” channel networks. SKB R-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-36 **Ericsson L, Holmén J, Rhén I, Blomquist N, 2006.** Storregional grundvattenmodellering – fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland. Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar. SKB R-06-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-37 **Painter S, 2006.** Effect of single-fracture aperture variability on field-scale transport. SKB R-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-38 **Svensson U, Kuylenstierna H-O, Ferry M, 2007.** DarcyTools, version 3.0 Concepts, methods, equations and demo simulations. SKB R-07-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-39 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-40 **Andersson J, Christiansson R, Hudson J, 2002.** Site investigations. Strategy for rock mechanics site descriptive model. SKB TR-02-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-41 **Hudson J (ed), 2002.** Strategy for a rock mechanics site descriptive model. A test case based on data from the Äspö HRL. SKB R-02-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-42 **Andersson J, Berglund J, Follin S, Hakami E, Halvarsson J, Hermanson J, Laaksoharju M, Rhen I, Wahlgren C-H, 2002.** Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-43 **SKB, 2002.** Forsmark – site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-44 **SKB, 2002.** Simpevarp – site descriptive model version 0. SKB R-02-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-45 **Ljunggren C, Chang Y, Jansson T, Christiansson R, 2003.** An overview of rock stress measurement methods. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 8–8, special issue on rock stress estimation.

- 26-46 **Hudson J A, Cornet F H, Christiansson R, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 8–8, special issue on rock stress estimation.
- 26-47 **Sjöberg J, Christiansson R, Hudson J A, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 8–8, special issue on rock stress estimation.
- 26-48 **Haimson B C, Cornet F H, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 8–8, special issue on rock stress estimation.
- 26-49 **Christiansson R, Hudson J A, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 4: Quality control of rock stress estimation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 8–8, special issue on rock stress estimation.
- 26-50 **Martin D, Christiansson R, Söderhäll J, 2001.** Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository. Based on Experiences from Äspö HRL, AECL's URL, tunneling and mining. SKB TR-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-51 **Andersson C, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar stability experiment. Feasibility study. SKB IPR-03-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-52 **Staub I, Andersson J C, Magnor B, 2004.** Äspö Pillar Stability Experiment. Geology and mechanical properties of the rock mass in TASQ. SKB R-04-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-53 **Hökmark H, Fälth B, Wallroth T, 2006.** T-H-M couplings in rock. Overview of results of importance to the SR-Can safety assessment. SKB R-06-88, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-54 **SKB, 2002.** Deep repository for spent nuclear fuel. Facility description – Layout E. SKB R-02-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-55 **Andersson C J, 2007.** Rock Mass Response to Coupled Mechanical Loading. Äspö Pillar Stability Experiment. PhD Thesis. Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- 26-56 **Martin C D, 1997.** Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. Can. Geotech. J. 43 (1997), pp 698–725.
- 26-57 **Martin D, 2005.** Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB TR R-05-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-58 **Christiansson R.** The latest development for in situ stress measuring techniques key note lecture in proceedings from ISRM Symposium on in situ rock stress. Measurements, Interpretation and Application, June 19-21, 2006. Balkema.
- 26-59 **Martin D.** Quantifying the in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. Design Step D2. SKB R-07-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-60 **Hakami E, Olofsson S-O, 2002.** Numerical modelling of fracture displacements due to thermal load from a KBS-3 repository. SKB TR-02-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-61 **Fälth B, Kristensson O, Hökmark H, 2005.** Äspö Pillar Stability Experiment. Thermo-mechanical 3D back analysis of the heating phase. SKB IPR-05-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-62 **Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-63 **Hökmark H, 2003.** Canister positioning. Influence of fracture system on deposition hole stability, SKB R-03-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-64 **Chryssantakis O, Tunbridge L, Christiansson R, 2003.** Numerical modeling in 3D of the TBM/ZEDEX tunnels at Äspö Hard Rock Laboratory and comparison with in-situ stress measurements. Proceedings of the Underground Construction Conference in London.
- 26-65 **Munier R, Hökmark H, 2004.** Respect distances: Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-66 **Bäckblom G, Munier R, 2002.** Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB TR-02-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-67 **Lund B, 2005.** Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: A parametric study of simple earth and ice models. SKB TR-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-68 **Lund B, 2006.** Stress variations during a glacial cycle at 500 meter depth in Forsmark and Oskarshamn: Earth model effects. SKB R-06-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-69 **Chan T, Christiansson R, Boulton G S, Ericsson L O, Hartikainen J, Jensen M R, Mas Ivars D, Stanchell F W, Vidstrand P, Wallroth T, 2005.** DECOVALEX III, BMT3/BENCHPAR WP4 The THM conditions during the dynamics of a glaciation cycle. A synthetic case based mainly on simplified data from the Whiteshell site. Submitted for reporting at SKI. Report of BMT3/WP4 – the thermo-hydro-mechanical responses to a glacial cycle and their potential implications for a deep geological disposal of nuclear fuel waste in a fractured crystalline rock mass. SKI report 2005:28, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm.

- 26-70 **Boulton G S, Chan T, Christiansson R, Ericsson L O, Hartikainen J, Jenssen M R, Stanchell F W, Wallroth T, 2004.** Thermo-hydro-mechanical (T-H-M) impacts of glaciation and implications for deep geological disposal of nuclear waste. In *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in GEO-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications*, pp 299–304, Elsevier Geo-Engineering Book Series, Volume 2, 2004, ISBN 0-08-044525-X.
- 26-71 **Vidstrand P, Wallroth T, Ericsson L O, 2007.** Coupled HM effects in a crystalline rock mass due to glaciation – indicative results from groundwater flow regimes and stresses from an FEM study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer. Submitted.
- 26-72 **Dehls J, 2006.** Permanent Scatterer InSAR processing: Forsmark. SKB R-06-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-73 **Glamheden R, Maersk L, Fredriksson A, Bergkvist L, Markström I, Elfström M, 2007.** Mechanical modelling of the Singö deformation zone. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. SKB R-07-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-74 **Cosgrove J, Stanfors R, Röshoff K, 2006.** Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. SKB R-06-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-75 **Munier R, 2006.** Demonstrating the efficiency of the EFPC criterion by means of Sensitivity analyses. SKB R-06-115, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-76 **Munier R, 2006.** Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes. SKB R-06-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-77 **Staub I, Jansson T, Fredriksson A, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar experiment. Geology and properties of the rock mass around the experiment volume. SKB IPR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-78 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-79 **Glamheden R, Hökmark H, Christiansson R, 2001.** Preliminary Results from 3DEC Modelling of a Deposition Tunnel in a KBS-3 type Repository. Proc. Workshop on Backfill Requirements for a KBS-3 type Repository. Äspö HRL, Sweden.
- 26-80 **Atkinson B K, 1984.** Subcritical crack growth in geological materials. *Journal Geophysical Research*. 89: 4088–4114.
- 26-81 **Atkinson B K, 1988.** Introduction to fracture mechanics and its geophysical applications. In B.K. Atkinson (Ed) *Fracture mechanics of rock*. Academic Press Geology Series. Academic Press.
- 26-82 **Glamheden R, Hökmark H, 2006.** Creep in jointed rock masses. SKB R-06-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-83 **Swantesson J O H, 1992.** Recent microweathering phenomena in southern and central Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes*, Volume 3, Issue 4. Pages: 275–292.
- 26-84 **Pässe T, 2004.** The amount of glacial erosion. SKB TR-04-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-85 **Laaksoharju M, Skarman C, Skarman E, 1999.** Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry* 14, pp 861–872.
- 26-86 **SKB, 2005.** Hydrogeochemical evaluation. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-87 **SKB, 2006.** Hydrogeochemical evaluation. Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-88 **Auqué L F, Gimeno, M J, Gómez J B, Puigdomenech I, Smellie J, Tullborg E-L, 2006.** Groundwater chemistry around a repository for spent nuclear fuel over a glacial cycle. Evaluation for SR-Can. SKB TR-06-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-89 **Gómez J, Laaksoharju M, Skårman E, Gurban I, 2006.** M3 version 3.0: Concepts, methods, and mathematical formulation. SKB TR-06-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-90 **Liu J, Löfgren M, Neretnieks I, 2006.** Data and uncertainty assessment for matrix diffusivity and porosity in-situ. SKB R-06-111, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-91 **Crawford J, Neretnieks I, Malmström M, 2006.** Data and uncertainty assessment for radionuclide K_d partitioning coefficients in granitic rock for use in SR-Can calculations. SKB R-06-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-92 **Byegård J, Gustavsson E, Tullborg E-L, Selroos J-O, 2005.** Bedrock transport properties. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-86, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-93 **Byegård J, Gustavsson E, Tullborg E-L, 2006.** Bedrock transport properties. Data evaluation and retardation model. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-94 **Waber H N, Smellie J, 2005.** SKB Site Investigations Forsmark Borehole KFM06: Characterisation of pore water. Part I: Diffusion experiments. SKB P-05-196, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-95 **Smellie J A T, Waber H N, Frape S K (eds), 2003.** Matrix Fluid Chemistry Experiment. Final report (June 1998 – March 2003). SKB TR-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 26-96 **Gascoyne M, Ross J D, Watson R L, 1996.** Highly saline pore fluids in the rock matrix of a granitic batholith on the Canadian Shield. Abstract: 30th Int. Geol. Congr., Beijing, China (August, 1996).
- 26-97 **Couture R A, Seitz M G, Steindler M J, 1983.** Sampling of brine in cores of Precambrian granite from northern Illinois. *J. Geophys. Res.*, 88, B(9), 7331–7334.
- 26-98 **Waber H N, Smellie J, 2006.** Pore water studies of borehole KLX03. In: Laaksoharju (ed.), Appendix 2: Preliminary site investigation, Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-99 **Gascoyne M, 1999.** Long-term maintenance of reducing conditions in a spent nuclear fuel repository. SKB R-99-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-100 **Bath A, Milodowski A, Ruotsalainen P, Tullborg E-L, Cortés Ruiz A, Aranyossy J-F, 2000.** Evidence from mineralogy and geochemistry for the evolution of groundwater systems during the quaternary for use in radioactive waste repository safety assessment (EQUIP project). EUR 19613 EN, European Commission, Nuclear Science and Technology.
- 26-101 **Landström O, Tullborg E-L, Eriksson G, Sandell Y, 2001.** Effects of glacial/post glacial weathering compared with hydrothermal alteration – implications for matrix diffusion. Results from drillcore studies in porphyritic quartz monzodiorite from Äspö SE, Sweden. SKB R-01-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-102 **Puigdomenech I, Ambrosi J-P, Eisenlohr L, Lartigue J-E, Banwart S A, Bateman K, Milodowski A E, West J M, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Yoshida H, Kotelnikova S, Pedersen K, Michaud V, Trotignon L, Rivas Perez J, Tullborg E-L, 2001.** O₂ depletion in granitic media: The REX project. SKB TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-103 **Gustafsson Å B, Puigdomenech I, 2003.** The effect of pH on chlorite dissolution rates at 25°C. In: R.J. Finch, D.B. Bullen (Editors), Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 757. *Mater. Res. Soc.*, Pittsburgh, Penn., pp 649-655.
- 26-104 **Tullborg E-L, 2004.** Palaeohydrogeological evidences from fracture filling minerals – Results from the Äspö/Laxemar area. In: V.M. Oversby, L.O. Werme (Editors), Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 807. *Mater. Res. Soc.*, Pittsburgh, Penn., pp 873–878.
- 26-105 **Degnan P, Bath A, Cortés A, Delgado J, Haszeldine S, Milodowski A, Puigdomenech I, Recreo F, Šilar J, Torres T, Tullborg E-L, 2005.** PADAMOT: Palaeohydrogeological Data Analysis and Model Testing. Project overview. PADAMOT Project Technical Report., UK Nirex Ltd, Harwell, UK. EU FP5 Contract nr FIKW-CT2001-20129.
- 26-106 **Stipp S L S, Hansen M, Kristensen R, Hochella J M F, Bennedsen L, Dideriksen K, Balic-Zunic T, Léonard D, Mathieu H J, 2002.** Behaviour of Fe-oxides relevant to contaminant uptake in the environment. *Chem. Geol.*, 190: 321–337.
- 26-107 **Dideriksen K, Stipp S L S, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. Iron oxides in fractures at Äspö. A feasibility study to test the possibility of finding a geothermometer or a palaeo-redox indicator. SKB IPR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-108 **Sandström B, Tullborg E-L, 2005.** Fracture mineralogy. Results from fracture minerals and wall rock alteration in boreholes KFM01B, KFM04A, KFM05A and KFM06A. Forsmark site investigation. SKB P-05-197, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-109 **Drake H, Tullborg E-L, 2006.** Fracture mineralogy, Results from drillcore KSH03H+B. SKB P-06-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-110 **Ganor J, Roueff E, Erel Y, Blum J D, 2005.** The dissolution kinetics of a granite and its minerals – Implications for comparison between laboratory and field dissolution rates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 607–621.
- 26-111 **Lowson R T, Comarmond M-C J, Rajaratnam G, Brown P L, 2005.** The kinetics of the dissolution of chlorite as a function of pH and at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol 69, pp 1687–1699.
- 26-112 **Sidborn M, Neretnieks I, 2004.** Modelling biochemical processes in rocks: Analysis and exploratory simulations of competition of different processes important for ferrous mineral oxidation and oxygen depletion. In: V.M. Oversby, L.O. Werme (Editors), Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 807. *Mater. Res. Soc.*, Pittsburgh, Penn., pp 829–834.
- 26-113 **Guimerà J, Duro L, Delos A, 2006.** Changes in groundwater composition as a consequence of deglaciation: implications for PA. SKB R-06-105, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-114 **Kienzler B et al. 2005.** Actinide Migration Experiment in the ÄSPÖ HRL in Sweden: Results for Uranium and Technetium with core #7 (Part IV), FZKA 7113, Forschungszentrum Karlsruhe.
- 26-115 **Kienzler B et al. 2005.** Actinide Migration Experiment in the ÄSPÖ HRL in Sweden: Analysis of Retained Uranium and Technetium in core #7 (Part V), FZKA 7196, Forschungszentrum Karlsruhe.
- 26-116 **André M, Neretnieks I, Malmström M E, 2005.** Determining Sorption Coefficients in Intact Rock Using an Electrical Potential Gradient as a Driving Force for Migration. *Mat. Res. Soc. Scientific Basis For Nuclear Waste Management XXIX*, Vol 932, pp 975–982.
- 26-117 **Anderson C, Jakobsson A-M, Pedersen K, 2006.** Influence of in situ biofilm coverage on the radionuclide adsorption capacity of subsurface granite. *Environmental Science and Technology* 41, pp 830–6.

- 26-118 **Pedersen K, 2002.** Microbial processes in the disposal of high level radioactive waste 500 m underground in Fennoscandian Shield rocks. In: M.J. Keith-Roach, F.R. Livens (Editors), *Interactions of Microorganisms with Radionuclides*. Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, pp 279–311.
- 26-119 **Kotelnikova S, Pedersen K, 1999.** The Microbe-REX project. Microbial O₂ consumption in the Äspö tunnel. SKB TR-99-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-120 **Haveman S A, Pedersen K, Ruotsalainen P, 1999.** Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. *Geomicrobiol. J.*, Vol 16, pp 277–294.
- 26-121 **Haveman S A, Pedersen K, 2002.** Distribution of culturable microorganisms in Fennoscandian Shield groundwater. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol 39, pp 129–137.
- 26-122 **Haveman S A, Pedersen K, 2002.** Microbially mediated redox processes in natural analogues for radioactive waste. *J. Contaminant Hydrol.*, Vol 55, pp 161–174.
- 26-123 **Anderson CR, Pedersen K, 2003.** In situ growth of *Gallionella* biofilms and partitioning of lanthanids and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. *Geobiology* 1, pp 169–178.
- 26-124 **Pedersen K, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. The MICROBE framework. Site descriptions, instrumentation, and characterisation. SKB IPR-05-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-125 **Anderson C, 2005.** Intra-terrestrial biosorption of radionuclides and analogous trace elements: Microbial interference with the water/rock interface. Ph.D. Thesis, Göteborg University, Göteborg, Sweden.
- 26-126 **Anderson C, Pedersen K, Jakobsson A-M, 2006.** Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. *Geomicrobiology Journal*, Vol 23, pp 15–29.
- 26-127 **Charbonneau A, Novakowski K, Ross N, 2006.** The effect of a biofilm on solute diffusion in fractured porous media. *J. Contaminant Hydrol.*, Vol 85, pp 212–228.
- 26-128 **Johnsson A J, Arlinger J, Pedersen K, Ödegaard-Jensen A, Albinsson Y, 2006.** Solid-aqueous phase partitioning of radionuclides by complexing compounds excreted by subsurface bacteria. *Geomicrobiol. J.*, Vol 23, pp 621–630.
- 26-129 **Nielsen M E, Pedersen K, Fisk M, Istok J, 2006.** Microbial nitrate respiration of lactate at in situ conditions in groundwater from a granitic aquifer situated 450 m underground. *Geobiology*, Vol 4, pp 43-52.
- 26-130 **Painter S, Cvetkovic V, Pickett D, Turner D, 2002.** Significance of kinetics for sorption on inorganic colloids: Modeling and experiment interpretation issues. *Environ. Sci. Technol.*, Vol 36, pp 5369–5375.
- 26-131 **Vahlund F, Hermansson H, 2004.** A direct numerical approach to solving the transport equations for radionuclide transport in fractured rock. SKB R-04-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-132 **García-García S, Jonsson M, Wold S, 2006.** Temperature effect on the stability of bentonite colloids in water, *J. Coll. Interf. Sci.*, Vol 298, pp 694–705.
- 26-133 **Ruskeeniemi T, Paananen M, Ahonen L, Kaija J, Kuivamäki A, Frapé S, Moren L, Degnan P, 2002.** Permafrost at Lupin (Phase I). Report YST-112, Geol. Surv. Finland, Espoo, Finland.
- 26-134 **Ruskeeniemi T, Ahonen L, Paananen M, Frapé S, Stotler R, Hobbs M, Kaija J, Degnan P, Blomqvist R, Jensen M, Lehto K, Moren L, Puigdomenech I, Snellman M, 2004.** Permafrost at Lupin (Phase II). Report YST-119, Geol. Surv. Finland, Espoo, Finland.
- 26-135 **Anisimova N P, 1980.** Hydrogeochemical investigations in permafrost studies. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost*, Edmonton, Alberta, July 10–13, 1978, pp 25–41.
- 26-136 **Alexee S V, Alexeeva L P, 2003.** Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia. *Hydrogeol. J.*, Vol 11, pp 574–581.
- 26-137 **Clark I D, Matsumoto R, Dallimore S R, Lowe B, Loop J, 1999.** Isotope constraints on the origin of pore waters and salinity in the permafrost and gas hydrate cpre intervals of the JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well. *Geol.Surv. Canada, Bull.*, Vol 544, pp 177–188.
- 26-138 **Gascoyne M, 2000.** A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. POSIVA 2000-09, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- 26-139 **Casanova L, Négrel P, Blomqvist, 2004.** Boron isotope fractionation in groundwaters as an indicator of past permafrost conditions in the fractured crystalline bedrock of the Fennoscandian Shield. *Water Res.*, Vol 39, pp 362–370.
- 26-140 **Clark I D, Lauriol B, 1992.** Kinetic enrichment of stable isotopes in cryogenic calcites. *Chemical Geology*, Vol 102, pp 217–228.
- 26-141 **Puigdomenech I, Gurban I, Laaksoharju M, Luukkonen A, Löfman J, Pitkänen P, Rhén I, Routsalainen P, Smellie J, Snellman M, Svensson U, Tullborg E-L, Wallin B, Vuorinen U, Wikberg P, 2001.** Hydrochemical Stability of groundwaters surrounding a spent nuclear fuel repository in a 100,000 year perspective. SKB TR-01-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-142 **Andersson P, Billaux D, Byegård J, Cvetkovic V, Dershowitz W, Doe T, Hermanson J, Poteri A, Tullborg E-L, Winberg A, 2006.** TRUE Block Scale Continuation Project, Final Report. SKB TR-06-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 26-143 **Poteri A, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. TRUE Block Scale continuation project. Evaluation of the BS2B sorbing tracer tests using the Posiva streamtube approach. SKB IPR-05-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-144 **Billaux D, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. TRUE Block Scale continuation project. Analysis of reactive transport in a fault structure and associated background fractures. SKB IPR-05-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-145 **Cheng H, Cvetkovic V, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. TRUE Block Scale continuation project. Evaluation of the BS2B sorbing tracer tests using the LASAR approach. SKB IPR-05-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-146 **Fox A, Dershowitz W, Ziegler M, Uchida M, Takeuchi S, 2005.** Äspö Hard Rock Laboratory. TRUE Block Scale continuation project. BS2B experiment: Discrete fracture and channel network modeling of solute transport modeling in fault and non-fault structures. SKB IPR-05-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-147 **Cheng H, Cvetkovic V, Winberg A, Dershowitz W D, 2006.** Estimating retention properties of components of a block scale fracture network – an example from the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. American Geophysical Union Fall Meeting, December 11–15, 2006. San Francisco CA.
- 26-148 **Poteri A, Cvetkovic V, Dershowitz W D, Winberg A, 2006.** Illustration of uncertainties in assessments of flow and transport in a block scale fracture network – an example from the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. American Geophysical Union Fall Meeting, December 11–15, 2006. San Francisco CA.
- 26-149 **Hodgkinson D, Black J, 2005.** Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Review of tasks 6A, 6B and 6B2. SKB TR-05-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-150 **Hodgkinson D, Black J, 2005.** Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Review of task 6C. SKB R-05-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-151 **Hodgkinson D, 2007.** Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Review of tasks 6D, 6E, 6F and 6F2. SKB TR-07-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-152 **Hodgkinson D, Benabderrahmane H, Elert M, Hautjärvi A, Selroos J-O, Tanaka Y, Uchida M, 2007.** Building a bridge between site characterisation and performance assessment for radioactive waste disposal in fractured rock. Hydogeology J. Submitted.
- 26-153 **EU, 2005.** Treatment of radionuclide transport in geosphere within safety assessments (Retrock). EUR 21230 EN, ISBN 92-79-00130-2.
- 26-154 **Löfgren M, Crawford J, Elert M, 2007.** Tracer tests – Possibilities and limitations. Experience from SKB fieldwork: 1977–2006. SKB R-07-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-155 **Nordqvist R, 2007.** Evaluation and modeling of SWIW tests performed within the SKB site characterisation programme. SKB R-07-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-156 **Hjerne C, 2007.** Modelling of SWIW tests with DarcyTools 3.0. SKB R-07-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-157 **Painter S, Mancillas J, Cvetkovic V, Pensado O, Selroos J-O, 2006.** Multiscale particle-based method for simulating transport in fractured rock. Geological Society of America Annual Meeting, October 22-25, 2006, Philadelphia PA.
- 26-158 **Painter S, Mancillas J, Cvetkovic V, Pensado O, Selroos J-O, 2006.** Method for efficient simulation of radionuclide transport in discrete fracture networks. American Geophysical Union Fall Meeting, December 11-15, 2006. San Francisco CA.
- 26-159 **Painter S, Cvetkovic V, Pensado O, 2007.** Time-domain random walk methods for simulating radionuclide transport in fractured porous rock. Nuclear Technology. In print.
- 26-160 **Painter S, Mancillas J, Cvetkovic V, Pensado O, 2007.** Time-domain particle tracking methods for simulating transport with retention and first-order transformations, Water Resour. Res. Submitted.
- 26-161 **Painter S, Cvetkovic V, 2005.** Upscaling discrete fracture network simulations: An alternative to continuum transport models, Water Resour. Res., Vol 41, W02002.
- 26-162 **Neretnieks I, 2006.** Channeling with diffusion into stagnant water and into a matrix in series, Water Resour. Res., Vol 42, W11418.

Kapitel 27

- 27-1 **SSI, 2005.** Statens strålskyddsinstitutets allmänna råd om tillämpning av föreskrifterna (SSI FS 1998:1) om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSI FS 2005:5, Statens strålskyddsinstitut Stockholm.
- 27-2 **SSI, 1998.** Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSI FS 1998:1, Statens strålskyddsinstitut Stockholm.
- 27-3 **Lindborg T, 2005.** Description of surface systems. Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-4 **Lindborg T, 2005.** Description of surface systems. Preliminary site description. Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-05-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 27-5 **Lindborg T, 2006.** Description of surface systems. Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-6 **SKB, 2006.** The Biosphere at Forsmark. Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R-06-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-7 **SKB, 2006.** The Biosphere at Laxemar. Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R-06-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-8 **Avila R, Ekström P A, Kautsky U, 2006.** Development of Landscape dose factors for dose-assessments in SR-Can. SKB TR-06-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-9 **Kumblad L, Kautsky U, 2005.** Using ecosystem modelling techniques in exposure assessments of radionuclides – an overview. IRSN Collection Series, Suppl. 1, Vol 39 (Proceedings from ECORAD 2004, Aix En Provence, France), pp 99–122.
- 27-10 **Jansson U, Kautsky U, Milliander S, 2006.** Rural landscape, production and human consumption: past present and future. *Ambio*. 35(8), pp 505–512.
- 27-11 **Avila R, Bergström U, 2006.** Methodology for calculation of doses to man and implementation in Pandora. SKB R-06-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-12 **Andersson E, 2005.** Benthic-Pelagic Microbial Interactions and Carbon Cycling in Clearwater Lakes. Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, p 39.
- 27-13 **Borgmark A, 2005.** The colour of climate: changes in peat decomposition as a proxy for climate change. A study of raised bogs in south-central Sweden. The Department of Physical Geography and Quaternary Geology Stockholm University.
- 27-14 **Lidman F, 2005.** Isotopic Disequilibrium for Assessment of Radionuclide Transport in Peat Lands. M. Sc. Thesis at the Department of Physics, Uppsala University.
- 27-15 **Tagesson T, 2005.** Aspects of the carbon cycle in terrestrial ecosystems of Northeastern Småland. Environmental Science, Lund University.
- 27-16 **Svanberg K, 2006.** Distribution of trace elements in a Baltic shallow bay ecosystem. Department of Systems Ecology, Stockholm University, p 57.
- 27-17 **Jarsjö J, Shibuo Y, Prieto C, Destouni G, 2006.** GIS-based modelling of coupled groundwater – surface water hydrology in the Forsmark and Simpevarp areas. SKB R-05-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-18 **Jones J, Vahlund F, Kautsky U, 2004.** Tensit – A novel probabilistic simulation tool for safety assessments – Tests and verifications using biosphere models. SKB TR-04-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-19 **Åstrand P-G, Jones J, Broed R, Avila R, 2005.** Pandora technical description and user guide. Posiva Working Report 2005-64, Posiva Oy, Finland.
- 27-20 **Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments – Modules for various biosphere types. SKB TR-99-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-21 **Karlsson S, Bergström U, Meili M, 2001.** Models for dose assessments. Models adapted to the SFR-area, Sweden. SKB TR-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-22 **Karlsson S, Bergström U, Rosén K, 2000.** Sensitivity analysis for modules for various biosphere types. SKB R-00-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-23 **Ekström P-A, Broed R, 2006.** Sensitivity Analysis Methods and a Biosphere. Test Case Implemented in Eikos. Posiva Working Report 2006-31, Posiva Oy Olkiluoto, Finland.
- 27-24 **Collins-Sussman B, Fitzpatrick B W, Pilato C M, 2004.** Version Control with Subversion Sebastopol, O'Reilly Media, USA, p 320.
- 27-25 **Sandberg J, 2004.** Test of the suitability of ECOSIM/ECOPATH modelling software as a complement to estimate flows of carbon, C-14 and radionuclides in the Öregrundsgrepen area. SKB R-04-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-26 **Sandberg J, Kumblad L, Kautsky U, 2007.** Can ECOPATH with ECOSIM enhance models of radionuclide flows in food webs? An example for C-14 in a coastal food web in the Baltic Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 92, pp 96–111.
- 27-27 **Avila R, 2006.** Model of the long-term transfer of radionuclides in forests. SKB TR-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-28 **Brydsten L, 2006.** Modelling groundwater discharge areas using only digital elevation models as input data. SKB TR-06-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-29 **Jarsjö J, Shibuo Y, Destouni G, 2004.** Using the PCRaster-POLFLOW approach to GIS-based modelling of coupled groundwater-surface water hydrology in the Forsmark area. SKB R-04-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-30 **DHI, 2004.** MIKE SHE. An integrated hydrological modelling system. User Guide. DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.
- 27-31 **Ewen J, Parkin G, O'Connell P E, 2000.** SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), pp 250–258.
- 27-32 **Werner K, Johansson P-O, Brydsten L, Bosson E, Berglund S, Tröjbom M, Nyman H, 2007.** Recharge and discharge of near-surface groundwater in Forsmark – Comparison of classification methods. SKB R-07-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 27-33 **Johansson P-O, Werner K, Bosson E, Berglund S, Juston J, 2005.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-34 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2005.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Simpevarp 1.2. SKB R-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-35 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2006.** Description of climate, surface hydrology, and near-surface hydrogeology. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-05-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-36 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2006.** Analysis of water flow paths - methodology and example calculations for a potential geological repository in Laxemar, Sweden. *Ambio*, 35(8), pp 425–434.
- 27-37 **Sokrut N, Werner K, Holmén J, 2007.** Integrated surface-subsurface water flow modelling of the Laxemar area. Application of the hydrological model ECOFLOW. SKB R-07-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-38 **Bosson E, 2006.** Near-surface hydrogeological model of Laxemar. Open repository – Laxemar 1.2. SKB R-06-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-39 **Bosson E, Berglund S, 2006.** Near-surface hydrogeological model of Forsmark – Open repository and solute transport applications – Forsmark 1.2. SKB R-06-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-40 **Vikström M, Gustafsson L-G, 2006.** Modelling transport of water and solutes in future wetlands in Forsmark. SKB R-06-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-41 **Kellner E, 2007.** Effects of variations in hydraulic conductivity and flow conditions on groundwater flow and solute transport in peatlands. SKB R-07-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-42 **Jonsson K, Elert M, 2005.** Model for radionuclide transport in running waters. SKB TR-05-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-43 **Jonsson K, Elert M, 2006.** Radionuclide transport in running waters, sensitivity analysis of bed-load, channel geometry and model discretisation. SKB R-06-77, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-44 **Gustafsson D, Jansson P-E, Gärdenäs A, Eckersten H, 2006.** Simulated carbon and water processes of forest ecosystems in Forsmark and Oskarshamn during a 100-year period. SKB TR-06-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-45 **Gärdenäs A, Jansson P-E, Karlberg L, 2006.** A model of accumulation of radionuclides in biosphere originating from groundwater contamination. SKB R-06-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-46 **Lidman F, 2006.** Radionuclide Transport in Peat Lands. A Complete Profile from Klarebäcksmossen (PSM006562) Analyzed by Gamma Spectrometry and ICP-AES. SKB TR-06-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-47 **Lindborg T, Kautsky U, 2004.** Ecosystem modelling in the Forsmark area – proceedings from two workshops modelling Eckarfjärden and Bolundsfjärden catchment areas. SKB R-04-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-48 **Wijnbladh E, Jönsson B, Kumblad L, 2006.** Marine Ecosystem Modeling Beyond the Box. Using GIS to Study Carbon Fluxes in a Coastal Ecosystem. *Ambio*, 35(8), pp 484–495.
- 27-49 **Engqvist A, Döös K, Andrejev O, 2006.** Modeling water exchange and contaminant transport through a Baltic coastal region. *Ambio*, 35(8), pp 435–447.
- 27-50 **Kumblad L, Söderbäck B, Löfgren A, Lindborg T, Wijnbladh E, Kautsky U, 2006.** Pools and fluxes of organic matter in a boreal landscape – implications for a safety assessment of a repository for nuclear waste. *Ambio*, 35(8), pp 496–504.
- 27-51 **Karlberg L, Gustafsson D, Jansson P-E, 2006.** Modelling carbon turnover in five terrestrial ecosystems in the boreal zone using multiple criteria of acceptance. *Ambio*, 35(8), pp 448–458.
- 27-52 **Sobek S, Söderbäck B, Karlsson S, Andersson E, Brunberg A K, 2006.** A carbon budget of a small humic lake: An example of the importance of lakes for organic matter cycling in boreal catchments. *Ambio*, 35(8), pp 469–475.
- 27-53 **Löfgren A, Miliander S, Truvé J, Lindborg T, 2006.** Carbon budgets for catchments across a managed landscape mosaic in southeast Sweden – contributing to the safety assessment of a radioactive waste repository. *Ambio*, 35(8), pp 459–468.
- 27-54 **Sohlenius G B T, Snäll S, Lundin L, Lode E, Stendahl J, Riise A, Nilsson J, Johansson T, Göransson M, 2006.** Soils, Quaternary deposits and bedrock in topographic lineaments situated in the Laxemar subarea. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-121, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-55 **Brunberg A K, Blomqvist P, 1998.** Vatten i Uppsala län 1997 – Beskrivning, utvärdering, åtgärdsförslag. Upplandsstiftelsen Uppsala. Rapport nr 8/1998.
- 27-56 **Jansson P-E, Karlberg L, 2004.** Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, Sweden, p 435.
- 27-57 **Karlberg L, Gustafsson D, Jansson P-E, 2006.** Modelling carbon and water flows in terrestrial ecosystems in the boreal zone – examples from Oskarshamn. SKB R-06-121, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-58 **Boresjö Bronge L, 2004.** Satellite remote sensing for estimating leaf area index, FPAR and primary production – A literature review. SKB R-04-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 27-59 **Tagesson T, 2006.** Indirect Estimations and Spatial Variation in Leaf Area Index of Coniferous, Deciduous and Mixed Forest Stands in Sweden. SKB TR-06-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-60 **Löfgren A, 2005.** Estimation of biomass and net primary production in field and ground layer, and biomass in litter layer of different vegetation types in Forsmark and Oskarshamn. Oskarshamn/Forsmark site investigation. SKB P-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-61 **Tagesson T, 2006.** Aspects of the carbon cycle in terrestrial ecosystems of Northeastern Småland. SKB R-06-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-62 **Andersson J, 2005.** Investigation of the amount of dead wood. Oskarshamn site investigation. SKB P-05-87, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-63 **Tagesson T, Lindroth A, 2007.** High soil carbon efflux rates in several ecosystems in southern Sweden. *Boreal Env. Res.* Vol 12, pp 65–80.
- 27-64 **Greger M, 2006.** Influence of water relations and growth rate on plant element uptake and distribution. SKB TR-06-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-65 **Johanson K J, Vinichuk M M, Nikolova I, Taylor A F S, 2004.** Uptake of elements by fungi in the Forsmark area. SKB TR-04-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-66 **Hannu S, Karlsson S, 2006.** Chemical characterisation of deposits and biota. Forsmark site investigation. SKB P-06-220, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-67 **Engdahl A, Hannu S, Ternsell A, 2006.** Chemical characterisation of deposits and biota. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-320, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-68 **Tröjbom M, Söderbäck B, 2006.** Chemical characteristics of surface systems in the Forsmark area. Visualisation and statistical evaluation of data from shallow groundwater, precipitation, and regolith. SKB R-06-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-69 **Tröjbom M, Söderbäck B, 2006.** Chemical characteristics of surface systems in the Simpevarp area. Visualisation and statistical evaluation of data from surface water, precipitation, shallow groundwater, and regolith. SKB R-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-70 **Roivainen P, 2006.** Stable elements and radionuclides in shoreline alder stands at Olkiluoto in 2005. Posiva Working Report 2006-70, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- 27-71 **Lundin L, Lode E, Stendahl J, Björkvald L, Hansson J, 2005.** Soils and site types in the Oskarshamn area. Oskarshamn site investigation. SKB R-05-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-72 **Lundin L, Lode E, Stendahl J, Melkerud P-A, Björkvald L, Thorstenson A, 2004.** Soils and site types in the Forsmark area. SKB R-04-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-73 **Lundin L, Stendahl J, Lode E, 2005.** Soils in two large trenches. Forsmark site investigation. SKB P-05-166, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-74 **Persson T, Lenoir L, Taylor A, 2007.** Bioturbation in different ecosystems at Forsmark and Oskarshamn. SKB R-06-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-75 **Brydsten L, 2006.** A model for landscape development in terms of shoreline displacement, sediment dynamics, lake formation, and lake choke-up processes. SKB TR-06-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-76 **Vikström M, 2005.** Modelling of soil depth and lake sediments. An application of the GeoEditor at the Forsmark site. SKB R-05-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-77 **Borgmark A, 2005.** Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis. *The Holocene*, Vol 15, pp 387–395.
- 27-78 **Borgmark A, 2006.** Physical parameters and accumulation rates in peat in relation to the climate during the last 150 years. SKB TR-06-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-79 **Miliander S, Punakivi M, Kyläkorpi L, Rydgren B, 2004.** Human population and activities in Forsmark. Site description. SKB R-04-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-80 **Miliander S, Punakivi M, Kyläkorpi L, Rydgren B, 2004.** Human population and activities at Simpevarp. Site description. SKB R-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-81 **Berg J, Jansson U, Wästfelt A, 2006.** Landscape, history and people in a geographical perspective. Studies of land-use, settlement and livelihood in Oskarshamn and Forsmark. SKB R-06-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-82 **Jansson U, Berg J, Björklund A, 2004.** A study on landscape and the historical geography of two areas – Oskarshamn and Forsmark. SKB R-04-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-83 **Kautsky U, 1995.** Ecosystem processes in coastal areas of the Baltic Sea. Ph. D. thesis, Dept. Zoology, Stockholm University, p 124.
- 27-84 **Kumblad L, 2004.** Radionuclides in the Baltic Sea: Ecosystem models and experiments on transport and fate. Stockholm University, Department of Systems Ecology, Stockholm, p 150.
- 27-85 **Nilsson G, 2004.** Investigation of sediments, peat lands and wetlands. Stratigraphical and analytical data. Oskarshamn site investigation. SKB P-04-273, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-86 **Risberg J, 2005.** Bio- and lithostratigraphy in offshore sediment core PFM004396. Salinity variations in the Bothnian Sea offshore Forsmark. Forsmark site investigation. SKB P-05-139, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-87 **Kaislahti Tillman P, Risberg J, 2006.** Holocene sedimentary environmental changes at sites PSM002118 and PSM002123 offshore Simpevarp. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-250, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 27-88 **Sternbeck J, Land M, Nilsson Ö, 2006.** 210pb and ¹⁴C dating of sediments and peat. Accumulation rates of carbon, nitrogen and phosphorus. Oskarshamn and Forsmark site investigations. SKB P-06-301, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-89 **Karlsson S, Nilsson A-C, 2007.** Sampling and analyses of gas in sediment. Sample from Lake Puttan. Forsmark site investigation. SKB P-07-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-90 **Kumblad L, Bradshaw C, Gilek M, 2005.** Bioaccumulation of Ni-63, Cr-51 and C-14 in Baltic Sea benthos. *Environmental Pollution*, Vol 134, pp 45–56.
- 27-91 **Bradshaw C, Kumblad L, Fagrell A, 2006.** The use of tracers to evaluate the importance of bioturbation in remobilising contaminants in Baltic sediments. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 66(1–2), pp 123–134.
- 27-92 **Strömberg M, Brunberg A-K, 2006.** Elemental composition of a deep sediment core from Lake Stocksjön in the Forsmark area. SKB R-06-96, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-93 **Avila R, 2006.** The ecosystem models used for dose-assessments in SR-Can. SKB R-06-81, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-94 **Andersson E, Kumblad L, 2006.** A carbon budget for an oligotrophic clearwater lake in mid-Sweden. *Aquatic Sciences*, Vol 68 pp 52–64.
- 27-95 **Andersson E, Brunberg A K, 2006.** Net autotrophy in an oligotrophic lake rich in dissolved organic carbon and with high benthic primary production. *Aquatic Microbial Ecology*, Vol 43, pp 1–10.
- 27-96 **Andersson E, Brunberg A K, 2006.** Inorganic nutrient acquisition in a shallow clearwater lake – dominance of benthic microbiota. *Aquatic Sciences*, Vol 68, pp 172–180.
- 27-97 **Andersson E, Sobek S, 2006.** Comparison of a mass balance and an ecosystem model approach when evaluating the carbon cycling in a lake ecosystem. *Ambio*, 35(8), pp 476–483.
- 27-98 **Andersson E, Karlsson S, Söderbäck B, Wijnbladh E, 2006.** Biomass of benthic and planktonic bacteria in Laxemar and Forsmark and biomass of Reed (*Phragmites australis*) in Lake Frisksjön. Oskarshamn and Forsmark site investigation. SKB P-06-232, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-99 **Karlsson S, Andersson E, 2006.** Distribution, biomass, production and respiration of submerged vegetation in Lake Bolundsfjärden. Forsmark site investigation. SKB P-06-221, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-100 **Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Effects of land-rise on the development of a coastal ecosystem of the Baltic Sea and its implementations for the long-term fate of ¹⁴C discharges. *Hydrobiologia*, 514(1), pp 185–196.
- 27-101 **Kumblad L, Kautsky U, Naeslund B, 2006.** Transport and fate of radionuclides in aquatic environments – the use of ecosystem modelling for exposure assessments of nuclear facilities. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 87, pp 107–129.
- 27-102 **Engqvist A, Stenström P, 2004.** Archipelago strait exchange processes – An overview. *Deep Sea Research*, 2(51), pp 371–392.
- 27-103 **Engqvist A, Kohonen T, Fladvad B, Helminen H, Wennström M, Mattila J, Andrejev O, 2005.** A joint decision support system for effective water protection measures in the archipelagos of Turku, Åland and Stockholm. The 8th International Marine Environmental Modelling Seminar, IMEMS 2005 23–25 augusti 2005, Helsingfors, Finland.
- 27-104 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-105 **Bergström U, Albrecht A, Kanyar B, Smith G, Thorne MC, Yoshida H, Wasiolek M, 2006.** Bioprotas: Key issues in biosphere aspects of assessment of the long-term impact of contaminant releases associated with radioactive waste management. Theme 2 Task 1: Model review and comparison for spray irrigation pathway. SKB TR-06-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-106 **Leclerc-Cessac E, Thomson G, 2006.** Guidance on Site-specific Biosphere Characterisation and Experimental Research and Field Research Protocols. Published on behalf of the BIOPROTA Steering Committee by ANDRA, Chatenay-Malabry, France.
- 27-107 **Punt A, Jackson D, Smith K, Walke R, 2006.** Population of the Bioprotas database – a draft report. UK NIREX LTD.
- 27-108 **Avila R, Thiry Y, Gilbin R, Agüero A, Thorne M, Sheppard M, Tamponnet C, Ikonen A, Xu S, 2006.** Recommendations for improving predictions of the long-term environmental behaviour of ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁹⁹Tc, ²³⁷Np and ²³⁸U. Findings of the IUR “Radioecology and Waste” Task Force. International Union of Radioecology IUR Report 6:2006.
- 27-109 **Ikonen A T K, 2006.** Posiva biosphere assessment: revised structure and status 2006. Posiva 2006-7, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- 27-110 **Lindborg T, Rubio Lind L, 2006.** Long-term development of the super-regional area of Olkiluoto/Forsmark/Laxemar. Minutes from the Posiva and SKB workshop, October 12–13, 2006 Rånäs Slott, Sweden. SKB P-06-302, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-111 **Lindborg T, Wijnbladh E, Kautsky U, 2006.** Surface system characterisation – a strategy to integrate biosphere descriptions. International High-Level Radioactive Waste Management Conference April 30 – May 4, 2006, Las Vegas, USA.

- 27-112 **Gärdenäs A, Eckersten H, Gustafsson D, Jansson P-E, Greger M, Avila R, Ekström P-A, 2006.** A model of accumulation of radionuclides in the soil-plant system originating from groundwater contamination. Modelling vadose zone flow and transport processes in radioactive waste management. Book of abstracts, SCK CEN -BA-13, Mol, Belgium, p 17–18.
- 27-113 **Gärdenäs A, Eckersten H, Gustafsson D, Jansson P-E, Greger M, Avila R, Ekström P-A, 2006.** Modelling long-term accumulation of radionuclides in the soil-plant-system originating from continuous groundwater contamination – a sensitivity analysis. Modelling vadose zone flow and transport processes in radioactive waste management. Book of abstracts, SCK CEN -BA-13, Mol, Belgium, p 19.
- 27-114 **Lindborg T, Lindborg R, Löfgren A, Söderbäck B, Bradshaw C, Kautsky U, 2006.** A strategy for describing the biosphere at candidate sites for repositories of nuclear waste – linking ecosystem and landscape modeling. *Ambio*, 35(8), pp 418–424.
- 27-115 **Avila R M, Kautsky U, Ekström P A, 2006.** Modeling the long-term transport and accumulation of radionuclides in the landscape for derivation of dose conversion factors. *Ambio*, 35(8), pp 513–523.
- 27-116 **Klos R, 2006.** Final report to Oversight: PSE Documentation 2006, SSI Dnr 2006/1250-05, SSI P 1529.06, Statens strålskyddsinstitut Stockholm.
- 27-117 **Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsundersökningar för ett djupförvar. SKB R-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-118 **Löfgren A, Lindborg T, 2003.** A Descriptive Ecosystem Model – a strategy for model development during site investigations. SKB R-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-119 **SKB, 2001.** Site investigations, investigation methods and general execution programme. SKB TR-01-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-120 **Nyman H, 2005.** Depth and stratigraphy of quaternary deposits. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-05-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-121 **SKB, 2005.** Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. Updated 2005-11-09. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-122 **SKB, 2006.** Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-123 **Cederlund G, Hammarström A, Wallin K, 2003.** Surveys of mammal populations in the areas adjacent to Forsmark and Tierp. SKB P-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-124 **Truvé J, Cederlund G, 2005.** Mammals in the areas adjacent to Forsmark and Oskarshamn. Population density, ecological data and carbon budget. SKB R-05-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-125 **Cederlund G, Hammarström A, Wallin K, 2005.** Survey of small rodent populations in the areas adjacent to Simpevarp. Results from 2004. Oskarshamn site investigation. SKB P-05-84, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-126 **Cederlund G, Hammarström A, Wallin K, 2005.** Surveys of mammal populations in Forsmark. Results from 2004. Forsmark site investigation. SKB P-05-151, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-127 **Kyläkorpil L, 2004.** Nature values and site accessibility maps of Forsmark and Simpevarp. Version 1.2. SKB R-04-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-128 **Sohlenius G, Hedenström A, Nyman H, 2006.** Characterisation of Quaternary deposits in Lake Frisksjön and Skettkäret. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-144, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-129 **Hedenström A, Sohlenius G, Albrecht J, 2004.** Stratigraphical and analytical data from auger drillings and pits. Forsmark site investigation. SKB P-04-111, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-130 **Nilsson A-C, Borgiel M, 2005.** Sampling and analyses of surface waters. Results from sampling in the Forsmark area, March 2004–June 2005. Forsmark site investigation. SKB P-05-274, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-131 **Huononen R, Borgiel M, 2005.** Sampling of phyto- and zooplankton in sea water. Abundances and carbon biomasses. Forsmark site investigation. SKB P-05-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-132 **Karlsson S, 2006.** Production and respiration measurements in Lake Bolundsfjärden 2005. Forsmark site investigation. SKB P-06-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-133 **Adill A, Andersson J, 2006.** Estimation of fish community biomass in Borholmsfjärden, NW Baltic Proper. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-134 **Borgiel M, 2005.** Benthic vegetation, plant associated macrofauna and benthic macrofauna in shallow bays and shores in the Grepen area, Bothnian Sea. Results from sampling 2004. Forsmark site investigation. SKB P-05-135, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-135 **Heibo E, Karås P, 2005.** The coastal fish community in the Forsmark area SW Bothnian Sea. Forsmark site investigation. SKB P-05-148, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-146 **Huononen R, 2005.** Benthic macrofauna, plant associated macrofauna and benthic vegetation in shallow lakes. Results from sampling 2004. Forsmark site investigation. SKB P-05-136, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 28

- 28-1 **SKB, 2004.** Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnbränsleavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-2 **Ahlström P-E (ed), Blomgren J, Ekberg C, Englund S, Fermvik A, Liljezin J O, Retegan T, Skarnemark G, Eriksson M, Seltborg P, Wallenius J, Westlén D 2007.** Partitioning and transmutation. Current developments – 2007. A report from the Swedish reference group SKB TR-07-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-3 **Ahlström P-E (ed), Andersson S, Ekberg Ch, Liljezin J-O, Nilsson M, Skarnemark G, Blomgren J, Eriksson M, Gudowski W, Seltborg P, Wallenius J, S Bal Raj, 2004.** Partitioning and transmutation. Current developments – 2004. SKB TR-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-4 **Blomgren J, Hildebrand A, Nilsson L, Mermod P, Olsson N, Pomp S, Österlund M, 2004.** Neutron data for accelerator-driven transmutation technologies. Annual Report 2003/2004. SKB R-04-69, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-5 **Blomgren J, Nilsson L, Mermod P, Olsson N, Pomp S, Öhrn A, Österlund M, 2005.** Neutron data for accelerator-driven transmutation technologies. Annual Report 2004/2005. SKB R-05-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-6 **Blomgren J, Nilsson L, Mermod P, Olsson N, Pomp S, Öhrn A, Österlund M, 2006.** Neutron data for accelerator-driven transmutation technologies. Annual Report 2005/2006. SKB R-06-120, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-7 **Andersson S, Drouet F, Ekberg Ch, Liljezin J-O, Magnusson D, Nilsson M, Retegan T, Skarnemark G, 2005.** Partitioning and transmutation Annual Report 2004. SKB R-05-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-8 **Andersson S, Ekberg Ch, Fermvik A, Hervieux N, Liljezin J-O, Magnusson D, Meridiano Y, Nilsson M, Retegan T, Skarnemark G, 2006.** Partitioning and transmutation Annual Report 2005. SKB R-06-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-9 **Dubois I, Ekberg Ch, Englund S, Fermvik A, Liljezin J-O, Neumayer D, Retegan T, Skarnemark G, 2007.** Partitioning and transmutation Annual Report 2006. SKB R-07-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-10 **Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, Jolkkonen M, Lagerstedt Ch, Talamo A, Westlén D, Grisell A, 2004.** System and safety studies of accelerator driven transmutation Annual Report 2003. SKB R-04-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-11 **Gudowski W, Wallenius J, Arzhanov V, Jolkkonen M, Tucek K, Eriksson M, Seltborg P, Westlén D, Lagerstedt Ch, Isaksson P, Ålander A, Gottlieb Ch, 2005.** System and safety studies of accelerator driven transmutation Annual Report 2004. SKB R-05-85, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-12 **Gudowski W, Wallenius J, Arzhanov V, Jolkkonen M, Eriksson M, Seltborg, Westlén D, Lagerstedt Ch, Isaksson P, Persson C-M, Ålander A, 2006.** System and safety studies of accelerator driven transmutation Annual Report 2005. SKB R-06-122, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-13 **Grundfelt B, Lindgren M, 2006.** Separation och transmutation. Belysning av tillämpning i Sverige. SKB R-06-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-14 **Dufek J, Arzhanov V, Gudowski W, 2006.** Nuclear spent fuel management scenarios. SKB R-06-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-15 **Sou 2004:67.** Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2004. Dels III kärnavfallsfrågan och framtiden. Transmutation – ett alternativ till slutförvaring. En uppmärksam fråga.
- 28-16 **Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The Very Deep Hole Concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR-98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-17 **SKB, 1986.** Kärnkraftsavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder. Del II Val av slutförvaringssystem. FoU-program 86, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-18 **SKB, 1989.** Kärnkraftsavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder. Del II Program 1990–1995. FoU-program 89, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-19 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-20 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-21 **SKB, 2000.** Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. SKB R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-22 **Harrison T, 2000.** Very deep borehole. Deutags opinion on boring, canister emplacement and retrievability. SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-23 **Nirex Ltd, 2004.** A review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste. Nirex Report no N/108, Nirex Ltd.
- 28-24 **Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 28-25 **Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige. SKB R-06-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-26 **Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Very deep hole concept. Thermal effects on groundwater flow. SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-27 **Åhäll K I, 2006.** Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål. En utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup. MKG Rapport 1, 27 sidor.
- 28-28 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-29 **Johnston A C, 1987.** Suppression of earthquakes by large continental ice sheets. *Nature*, 330, pp 467–469.
- 28-30 **Johnston P, Wu P, Lambeck K, 1998.** Dependence of horizontal stress magnitude on load dimension in glacial rebound models. *Geophys. J. Int.*, Vol 12, pp 41–60.
- 28-31 **Lund B, 2005.** Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: A parametric study of simple Earth and ice models. SKB TR-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-32 **Lund B, 2007.** Muntlig kommunikation med B. Lund, Institutionen för geovetenskaper, Geofysik, Uppsala universitet.
- 28-33 **Jonsson S, Segall P, Pedersen R, Björnsson G, 2003.** Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, Vol 424, pp 179–183.

Kapitel 29

- 29-1 **KASAM, 1998.** Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 1998. (SOU 1998:68). Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 29-2 **KASAM, 2007.** Slutförvaring av använt kärnbränsle. Regelsystem och olika aktörers roller under beslutsprocessen. Rapport från ett KASAM-seminarium den 15 november 2006. Rapport 2007:1. Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 29-3 **KASAM, 2007.** Tid för slutförvaring av kärnavfall – samhälle, teknik och natur. En fördjupning till KASAM:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007 (SOU 2007:38). Rapport 2007:3. Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 29-4 **KASAM, 2007.** Riksperspektiv på slutförvaring av kärnavfall – individ, samhälle och kommunikation. En fördjupning till KASAM:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007 (SOU 2007:38). Rapport 2007:4. Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 29-5 **KASAM, 2007.** Strålningens forskningsutsikter. En översikt om kärnavfallsfrågor inom samhällsvetenskaplig forskning. Rapport 2007:5. Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 29-6 **SKB, 1995.** Förstudie Storuman. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-7 **SKB, 1996.** Förstudie Malå. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-8 **SKB, 2000.** Förstudie Östhammar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-9 **SKB, 2000.** Förstudie Nyköping. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-10 **SKB, 2000.** Förstudie Älvkarleby. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-11 **SKB, 2000.** Förstudie Oskarshamn. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-12 **SKB, 2000.** Förstudie Hultsfred. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-13 **SKB, 2000.** Förstudie Tierp. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-14 **SKB, 1997.** Långsiktig förvaring av Sveriges använda kärnbränsle. SKB:s perspektiv på beslutsprocessen. SKB R-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-15 **Fredriksson C, Gramner C, 1998.** Förstudie Oskarshamn. Omvärldsanalys för Oskarshamn. SKB R-98-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-16 **Lidskog R (ed), 1998.** Kommunen och kärnavfallet. Svensk kärnavfallspolitik på 1990-talet. ISBN 91-7203-250-2.
- 29-17 **SKB, 2005.** Samhällsforskning 2005 – Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB. ISBN 91-975606-3-4.
- 29-18 **SKB, 2006.** Samhällsforskning 2006 – Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB. ISBN 91-976141-3-0.
- 29-19 **Lindgren U, Strömberg M, 2007.** Slutförvarets lokala effekter på befolkning och sysselsättning i Östhammar och Oskarshamn. SKB R-07-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-20 **Andersson-Skog L, 2007.** Växtkraft av kärnkraft? Kärnkraftetableringens socioekonomiska effekter i Oskarshamn och Östhammar 1960–2000. SKB R-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-21 **Soneryd L, Lidskog R, 2006.** Allmänhet, expertis och deliberation – Samråd om slutförvar av kärnavfall. SKB R-06-118, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-22 **Sjöberg L, 2006.** Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle. SKB R-06-97, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-23 **Anshelm J, 2006.** Från energiresurs till kvittblivningsproblem – Frågan om kärnavfallets hantering i det offentliga samtalet i Sverige, 1950–2002. SKB R-06-113, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-24 **Johansson P, Lisberg Jensen E, 2006.** Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner. SKB R-06-119, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 29-25 **Cramér P, Stendahl S, Erhag T, 2007.** Nationellt ansvar för använt kärnbränsle i en utvidgad europeisk union? SKB R-07-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 29-26 **Sjölander A, 2007.** Som natt och dag trots samma kärnas ursprung? Om (o)likhet och opinioner i nationella och lokala/regionala mediers hantering av kärnfrågan. SKB R-07-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 30

- 30-1 **Lindgren U, Strömgren M, 2007.** Slutförvarets lokala effekter på befolkning och sysselsättning i Östhammar och Oskarshamn. SKB R-07-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 30-2 **Andersson-Skog L, 2007.** Växtkraft av kärnkraft? Kärnkraftetableringens socioekonomiska effekter i Oskarshamn och Östhammar 1960–2000. SKB R-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 31

- 31-1 **Soneryd L, Lidskog R, 2006.** Allmänhet, expertis och deliberation – Samråd om slutförvar av kärnavfall. SKB R-06-118, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 32

- 32-1 **Johansson P, Lisberg Jensen E, 2006.** Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner. SKB R-06-119, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 32-2 **Sjöberg L, 2006.** Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle. SKB R-06-97, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 32-3 **Anshelm J, 2006.** Från energiresurs till kvittblivningsproblem – Frågan om kärnavfallens hantering i det offentliga samtalet i Sverige, 1950–2002. SKB R-06-113, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 32-4 **Sjölander A, 2007.** Som natt och dag trots samma kärnas ursprung? Om (o)likhet och opinioner i nationella och lokala/regionala mediers hantering av kärnfrågan. SKB R-07-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 33

- 33-1 **Cramér P, Stendahl S, Erhag T, 2007.** Nationellt ansvar för använt kärnbränsle i en utvidgad europeisk union? SKB R-07-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 35

- 35-1 **SKB, 2006.** Återkommande helhetsbedömning av anläggningens säkerhet – Erfarenheter för SFR 1 under perioden 1988–2005. SKB-R-06-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 35-2 **SKB, 2007.** Plan 2007. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 35-3 **Gustavsson B, Hedin G, Johnsson H, Cassidy C, Swenson B, 2006.** Swedish BWR Reference Plant Decommissioning Study. Westinghouse Report SEP 06-055, rev 0, Westinghouse Electric Sweden AB.

Kapitel 36

- 36-1 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 36-2 **SKB, 1999.** Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. Preliminary safety assessment. SKB TR-99-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 37

- 37-1 **Gustavsson B, Hedin G, Johnsson H, Cassidy C, Swenson B, 2006.** Swedish BWR Reference Plant Decommissioning Study. Westinghouse Report SEP 06-055, rev 0, Westinghouse Electric Sweden AB.
- 37-2 **Pålsson J, Hedin G, 2005.** Studie av anläggningsdrift vid rivning och återställande av anläggningsplatsen. Westinghouse Rapport SEP 04-214, rev 0, Westinghouse Electric Sweden AB.
- 37-3 **Ericsson S, 2005.** Studie av byggnadsrivning av de svenska kärnkraftverken – Slutrapport. Westinghouse Rapport SEP 03-503, rev 0, Westinghouse Electric Sweden AB.
- 37-4 **Cronstrand P, 2005.** Assessment of uncertainty intervals for sorption coefficients – SFR-1 uppföljning av SAFE. SKB R-05-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-5 **Cronstrand P, 2005.** Assessment of uncertainty to correlation factors. SKB R-05-76, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-6 **Persson P, 2005.** Measurements of activity concentrations of ⁵⁹Ni and ⁶³Ni in spent ion-exchange resins – Final report for SKB project “Ni-59 i jonbytarmassor”. SKB R-05-77, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 37-7 **Magnusson Å, Stenström S, 2005.** ¹⁴C produced in Swedish nuclear power reactors – measurements on spent ion exchange resins, various process water systems and ejector off-gas. SKB R-05-78, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-8 **Lundgren K, 2005.** Jod-129: Uppskattning av aktivitet i driftavfall från svenska LWR. SKB R-05-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-9 **Lundgren K, 2006.** Mo-93, Tc-99 och Cs-135: Uppskattning av aktivitet i driftavfall från svenska LWR. ALARA Rapport 06-0031R, ALARA Engineering.
- 37-10 **Lindgren M, Pettersson M, Wiborgh M, 2007.** Correlation factors for C-14, Cl-36, N1-59, Ni-63, Mo-93, Tc-99, I-129 and Cs-135 In operational waste for SFR 1. SKB R-07-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-11 **Vidstrand P, 2003.** Surface and subsurface conditions in permafrost areas – a literature review. SKB TR-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-12 **Holmén J G, 2005.** SFR-1. Inverse modelling of inflow to tunnels and propagation of estimated uncertainties to predictive stages. SKB R-05-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-13 **Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 37-14 **Thomson G, Miller B, 2005.** SFR 1. Post closure radionuclide release and dose calculations. SKB R-05-81, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 38

- 38-1 **SKB, 2004.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar, ”guideline”. SKB R-04-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 38-2 **Soldéus U, 2005.** Miljökonsekvensbeskrivning Barsebäcksverket. Barsebäck Rapport 1876391 / 2.0, Barsebäck Kraft AB.

Kapitel 40

- 40-1 **Gustavsson B, Hedin G, Johnsson H, Cassidy C, Swenson B, 2006.** Swedish BWR Reference Plant Decommissioning Study. Westinghouse Report SEP 06-055, rev 0, Westinghouse Electric Sweden AB.
- 40-2 **Johansson B, Hansson T, 2000.** PWR R2 Rivningsstudie 2000. Ringhals Rapport 1606211 / 2.0, Ringhals AB.
- 40-3 **Hedin G, Gustavsson B, Carlsson J, 2004.** Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk. SKB R-04-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bilaga A

- A-1 **SKB, 2006.** Kapsel för använt kärnbränsle. Konstruktionsförutsättningar. SKB R-06-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-2 **SKB, 2005.** Kapseltillverkning – Kvalitetshandbok (pärm1). Ritningar Specifikationer Rutiner (pärm 2). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-3 **Vieno T, 2000.** Groundwater salinity at Olkiluoto and its effects on a spent fuel repository. Posiva 2000-11, Posiva Oy.
- A-4 **King F, Ahonen L, Taxén C, Vuorinen U, Werme L, 2001.** Copper corrosion under expected conditions in a deep geological repository. SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-5 **Guimerà J, Duro L, Jordana S, Bruno J, 1999.** Effects of ice melting and redox front migration in fractured rocks of low permeability. SKB TR-99-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-6 **Guimerà J, Duro L, Delos A, 2006.** Changes in groundwater composition as a consequence of deglaciation: implications for performance assessment. SKB R-06-105, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-7 **Hedin A, 2004.** Integrated near-field evolution model for a KBS-3 repository. SKB R-04-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-8 **SKB, 2006.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-9 **King F, Kolar M, 2004.** Theory manual for the copper corrosion model for stress corrosion cracking of used fuel disposal containers. CMM-SCC.0, Ontario Power Generation Report No: 06819-REP-01300-10095-R00, Ontario Power Generation.
- A-10 **King F, Kolar M, 2005.** Preliminary assessment of the stress corrosion cracking of used fuel disposal containers using the CMM-SCC.0 model, Ontario Power Generation Report No: 06819-REP-01300-10103-R00, Ontario Power Generation.
- A-11 **Salonen T, 2004.** Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Encapsulation Technology, Memo, Posiva Oy.
- A-12 **Gubner R, 2007.** Corrosion Resistance of Copper Canister Weld Material. Korrosions- och Metallforskningsinstitutet AB rapport KIMAB-2007-805.

- A-13 **Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2004.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. SKB TR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-14 **Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Uneven swelling pressure on the canister. FEM calculations of the effect of uneven water supply in the rock. SKB Projekt Inkapsling Projekt PM 98-3420-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-15 **Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole when creep is considered – first model. Effect on the canister and the buffer. SKB R-06-87, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-16 **Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 1999.** Influence of phosphorous and sulphur as well as grain size on creep in pure copper. SKB TR-99-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-17 **Fennell P A H, Graham A J, Smart N R, Sofield C J, 2001.** Grain boundary corrosion of copper canister material. SKB TR-01-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-18 **Gubner R, Andersson U, Linder M, Nazarovov A, Taxén C, 2006.** Grain boundary corrosion of copper canister weld material. SKB TR-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-19 **Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 2005.** Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 and 175°C. SKB TR-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-20 **Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 2007.** Creep testing and creep loading experiments on friction stir welds in copper at 75°C. Korrosions- och Metallforskningsinstitutet AB rapport KIMAB-2007-111.
- A-21 **Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-22 **Börgesson L, Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Influence of shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage to the canister. SKB TR-06-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-23 **Agrenius L, 2002.** Criticality safety calculations of storage canisters. SKB TR-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- A-23 **SKI, 2007.** Sammanfattning av utredningar om kopparkapselns material och dess integritet i slutförvaret. SKI-Utredningsrapport, SKI 2006/109. Statens kärnkraftinspektion.

Kapsel för använt kärnbränsle – konstruktionsförutsättningar

A1 Konstruktionsförutsättningar

SKB har presenterat en ny utgåva av konstruktionsförutsättningarna för kapseln /A-1/ som redovisar status och kunskapsläge. Med tanke på den vikt som myndigheterna lagt vid konstruktionsförutsättningar och dimensioneringsunderlag i granskningen av Fud 2004 redovisas viktiga delar av SKB:s nya utgåva av konstruktionsförutsättningarna i denna bilaga. I några fall har uppgifter korrigerats med hänsyn till nuvarande kunskapsläge (avsnitt A1.3.3 när det gäller partiklar från svetsverket, avsnitt A1.4.2 när det gäller dragspänningar under vattenmättnadsfasen och avsnitt A1.4.4. när det gäller nyare beräkningar av töjningen i insatsen). Programmet för det fortsatta arbetet presenteras i avsnitt 14.2 i del III.

A1.1 Utformning av kapseln

SKB:s referenskapsel består av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. Kapseln finns i två utformningar, en som rymmer tolv BWR-element och en som rymmer fyra PWR-element. Detaljutförande finns beskrivet i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /A-2/.

De funktionskrav som påverkar kapselns utformning och materialval är att kapseln ska:

- Innesluta och förhindra spridning av radioaktiva ämnen från det använda kärnbränslet.
- Motstå de korrosionsangrepp som förväntas i slutförvaret.
- Motstå de belastningar som förväntas i slutförvaret.
- Ha försumbar termisk, kemisk och mekanisk inverkan på de övriga barriärernas och bränslets bidrag till isolering och fördröjning.
- Kapseln ska kunna transporteras, deponeras och i övrigt hanteras på ett säkert sätt.

Dessutom ska kapslar med specificerade egenskaper kunna tillverkas, förslutas och kontrolleras med hög tillförlitlighet i produktionen och dess egenskaper ska gå att kontrollera mot specificerade acceptanskriterier.

Hur dessa krav har beaktats vid utformning av kapselns kopparhölje och insats redovisas nedan.

A1.2 Innesluta bränslet

Kapseln ska innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen. Kapseln ska rymma de olika typer av använt kärnbränsle som ingår i det svenska kärnkraftsprogrammet och bränsleelementens geometri är utgångspunkten för att bestämma storleken på kanalerna för bränsleelementen i kapseln.

Dimensionerande för den tillåtna resteffekten i kapseln är att den kemiska stabiliteten i bentonitbufferten ska bibehållas. Ett ställt krav på maxtemperatur på kapselns yta efter deponering är bestämmande för inkapslingsprocessen (tillåten resteffekt hos det inkapslade bränslet) men inte för kapselns utformning.

A1.3 Kemisk beständighet under förvarets livstid

A1.3.1 Översikt av förvarets utveckling

Tre karakteristiska klimattillstånd förväntas förekomma under den tid förvaret ska fungera. Dessa påverkar miljön på förvarsdjupet och därmed förutsättningarna för kapselns kemiska beständighet. De beskrivs översiktligt nedan.

Tempererat/borealt tillstånd, är den period då klimatet gradvis förändras. Under detta tillstånd är förändringar av strandlinjen den process som är av betydelse för grundvattensammansättningen.

Permafrosttillstånd innebär lägre vattenomsättning än under nuvarande förhållanden. Utfrysning av salt och en låg vattenomsättning kan tillsammans leda till en betydande ökning av salthalten i grundvattnet /A-3, A-4/.

Glacialt tillstånd innebär att grundvattenflödet styrs av istäcket och dess utbredning. Detta kommer att driva ner glacialt smältvatten till stora djup. Beräkningar visar att det är möjligt att glacialt smältvatten når förvarsdjup. Beräkningar visar också att bergets redoxbuffrande förmåga gör att endast syrefritt vatten kommer att nå förvarsdjup /A-5, A-6/.

A1.3.2 Kopparkapseln i slutförvaret

Grundvattnet på förvarsdjup kommer att vara syrefritt och reducerande utom under driftskedet och under en relativt kort period därefter. Kopparkapseln är immunt mot korrosion i rent syrefritt vatten. För att kopparkapseln ska korrodera i vattenlösningar krävs närvaro av löst syre, höga kloridhalter, låga pH-värden eller löst sulfid.

Kapseln är omgiven av kompakterad bentonit. Eftersom bentonit inte innehåller några klorhaltiga mineraler av betydelse kommer kloridhalten i grundvattnet att bestämma kloridhalten också i bentonitbufferten. Sulfidhalterna förväntas inte heller bli högre än i grundvattnet och pH-värdet förväntas ligga i intervallet 7–9. Kopparkapseln är, även vid de högsta förväntade kloridhalterna, immunt mot kloridkorrosion vid de pH-värden som förväntas.

Under den initiala fasen fram till syrefria förhållanden i förvaret sker endast obetydlig *aerob korrosion* av kopparkapseln motsvarande en avfrätning av tre mikrometer. Denna process är inte dimensionerande för kapselns utformning. Efter att syret förbrukats kommer korrosionen (*anaerob korrosion*) att styras helt av tillförseln av löst sulfid till kapseln. Med den modell /A-7/ som användes i SR-Can /A-8/ beräknas korrosionsangreppet på de mest utsatta delarna på kapseln vara mindre än sex millimeter.

Med tanke på att FSW-svetsar inte har en avvikande korrosionspotential med syre närvarande kan galvanisk korrosion uteslutas även under anaeroba förhållanden.

För att *spänningskorrosion* ska kunna ske krävs ett samspel av flera parametrar /A-9, A-10/. Två nödvändiga parametrar är specifika kemiska förhållanden och samtidiga dragspänningar i kapselytan. Det är mycket osannolikt att spänningskorrosion skulle kunna förekomma under förvarsförhållanden /A-4/ och *spänningskorrosion* är därmed inte en dimensionerande process för kapseln.

Efter vattenmättnad kommer *radiolys* av vatten nära kapseln att äga rum. Därför ställs krav på den tillåtna ytdosraten, kravet har satts till maximalt 1 Gy/h. Referenskapslarna (för BWR- respektive PWR-element) uppfyller kravet på ytdosrat.

Osäkerheter

I SR-Can diskuteras osäkerheter i modeller, speciellt beträffande bentoniterosion och dess konsekvenser för anaerob korrosion. Ytterligare kunskaper krävs kring bentoniterosion innan dessa osäkerheter kan undanröjas.

Slutsatser

Med nuvarande kunskaper är *anaerob korrosion* en dimensionerande process för kopparkapseln och koppartäckningen måste minst uppgå till sex millimeter. De repor och andra geometriska avvikelser i kopparhöljets yta som kan uppstå vid bearbetning eller hantering av kapseln påverkar inte den anaeroba korrosionen. Det finns därför inget skäl att ställa krav på till exempel tillåtet djup hos repor och slagmärken från långsiktig korrosionssynpunkt såvida de inte riskerar att penetrera kopparhöljet ned till ett djup som motsvarar minsta tillåten korrosionsbarriär (sex millimeter).

A1.3.3 Material – kopparhöljet, korrosionsaspekter

Anaerob korrosion är en bestämmande process för valet av kopparkvalitet. Koppar med låg syrehalt ska väljas för att eliminera riskerna för korngränskorrosion på grund av oxidutskiljningar i korngränserna. För att få tillräcklig kemisk beständighet kan syrehalter på upp till 30 ppm tolereras. Av samma skäl krävs att kopparen har låga halter av föroreningsämnen som skulle kunna korrodera selektivt eller segregera till korngränserna och öka riskerna för korngränskorrosion. Även här är tillåtna högsta halten av aluminium, kobolt, krom respektive nickel 30 ppm vardera. Som referensmetod för svetsning har SKB valt friction stir welding (FSW). För svetsbarhet med FSW kan inga ytterligare krav på kopparmaterialet härledas utöver de som diskuterats ovan. Om FSW utförs i luft kan syrehalten öka i svetsgodset och detta har påvisats i form av oxidpartiklar /A-11/. Prov med svetsning i skyddsgas (argon) visar att oxidpartiklarna nästan helt kan elimineras. Det har även observerats små mängder metall från svetsverktyget i svetsen. De föroreningar som påvisats är aluminium, kobolt, krom och nickel och halterna är som högst några tiotal ppm. Det är dock inte klarlagt om föroreningarna ligger som diskreta mikroinklusioner eller är lösta i kopparen.

Enstaka partiklar från verktyget på svetsytan kommer inte att kunna påverka kapselns livslängd. Selektiv, galvanisk, korrosion kommer sannolikt att förbruka dessa partiklar och förlusten av korrosionsbarriären kommer att vara helt försumbar. Studier vid Kimab /A-12/ har visat att inte ens under anaeroba förhållanden avviker svetsens korrosionspotential från grundmaterialets. De små mängderna föroreningar från svetsverktyget kommer alltså inte att försämra svetsens korrosionsegenskaper eller ge upphov till galvanisk korrosion av svetsen. Senare utveckling visar att läckage av lergeringsämnen från svetsverktyget in i kopparmaterialet kan elimineras genom att tappen beläggs med ett keramiskt skikt, se avsnitt 14.5.1 i del III.

A1.3.4 Insatsen i slutförvaret

Insatsen skyddas mot omgivningen av kopparhöljet så länge detta är tätt. Trots detta kan en viss kemisk påverkan på insatsen orsakas av att små mängder vatten kan följa med bränslet vid inkapslingen. Om det finns luft i kapseln kan radiolysreaktioner mellan vattnet och kvävet i luften bilda salpetersyra. Syran kan ge spänningskorrosion. Därför är kapseln utformad så att luften i insatsen kan bytas ut mot en inert gas, till exempel argon. Eventuellt restsyre och vatten i kapseln kommer att förbrukas genom korrosion av järnet. När syret är förbrukat kommer vattnet genom anaerob järnkorrosion att bilda vätgas. Undersökningar pågår för att klarlägga om vätgasen påverkar kapselmaterialets egenskaper.

Osäkerheter

Ytterligare kunskaper krävs kring förekomst av vatten i bränslet samt effekter av vätgas på kapselmaterialet för att utesluta att kemiska processer kan påverka insatsen.

Slutsatser

Atmosfärsbyte i insatsen förhindrar spänningskorrosion.

A1.3.5 Material – insatsen, korrosionsaspekter

Inga härledbara materialkrav på insatsen ställs från korrosionssynpunkt.

A1.4 Mekanisk beständighet

A1.4.1 Förvarets utveckling, översikt

Kapseln ingår i ett komplext mekaniskt system i slutförvaret. Klimatförändringar på jordytan så som glacialcykler påverkar kapseln både mekaniskt och hydrauliskt. Närmast kapseln finns en kemisk/mechanisk buffert bestående av 35 centimeter bentonit som orsakar mekaniska påkänningar på kapseln när den sväller.

Utvecklingen av de mekaniska påkänningarna på kapseln kan indelas i följande faser:

- Vattenmättnadsfasen.
- Tempererade-/boreala fasen och permafrostfasen.
- Glaciala fasen.
- Postglaciala fasen.

Vattenmättnadsfasen börjar direkt efter deponeringen. Då sker en tryckuppbyggnad runt kapseln på grund av ökande grundvattentryck och svällande bentonit. Grundvattentrycket beror på förvarsdjupet. Vatteninflödet i deponeringshålen medför att bentoniten sväller. Det svälltryck som bildas beror på bentonitens densitet /A-13/.

Tempererade/boreala fasen och *permafrostfasen* som inträffar efter vattenmättnadsfasen, innebär att det råder stabila mekaniska förhållanden för kapseln. Dock kan vissa tryckjämnheter kvarstå efter vattenmättnadsfasen till följd av ojämn svällning av bentoniten och eventuell inverkan från deponeringshålets geometri.

Glaciala fasen, isbildningen, ger en långsam isostatisk tryckuppbyggnad i förvaret. Denna tryckökning beror av isens tjocklek vilken i sin tur beror på förvarets geografiska placering och klimatologiska faktorer. Det maximala isostatiska trycket på kapseln blir 45 MPa för Forsmarksfallet och 42 MPa för Laxemarfallet beräknat utifrån det tjockaste istäcke som funnits under de senaste två miljoner åren (Saale-istiden) /A-8/.

Postglaciala fasen innebär en långsam trycksänkning i förvaret tillbaka till de förhållanden som rådde innan den glaciala fasen. När berget avlastas kan, under vissa förhållanden, jordbävningar uppstå som kan påverka kapseln mekaniskt. En jordbävning kan leda till att befintliga sprickor som skär deponeringshål aktiveras och skjuvas. En jordbävning med magnituden sex orsakar en skjuvrörelse över ett deponeringshål motsvarande 0,1 meter /A-8/.

A1.4.2 Kopparkapseln i slutförvaret

Påkänningarna på kopparkapseln bestäms ytterst av processerna i förvaret men vid fastställande av påkänningarna måste även kapselns konstruktion beaktas.

Tryckuppbyggnaden under vattenmättnadsfasen gör att kopparkapseln deformeras och tar stöd mot insatsen. Storleken på de plastiska och/eller kryptöjningar detta ger upphov till beror på storleken på glappet mellan kopparkapseln och insatsen. Tillverkningstoleranserna gör att det radiella glappet mellan insatsen och kopparkapseln uppgår till maximalt 1,75 millimeter. Töjningen som kopparkapseln utsätts för uppgår till 4 procent.

Beräkningarna har genomförts för en kapsel med ändarna fixerade av bentoniten och med det pessimistiska antagandet att vattentillförseln skedde enbart på en sida av kapseln. Den ojämna svällningen ledde då till lokala dragspänningar i kopparkapseln på upp till 59 MPa /A-14/ det vill säga lokal plasticering av kopparkapseln. Erfarenheter från Prototypförvaret och Återtagningsförsöket i Äspölaboratoriet kan leda till mer realistiska scenarier för ojämn svällning av bentoniten än den som användes i analysen i /A-14/.

I samband med postglaciala jordbävningar kan skjuvrörelser i deponeringshålet påverka kopparkapseln. Efter den initiala plasticeringen av systemet buffert/kapsel sker en återhämtning genom krypning. Beräkningar /A-13, A-15/ visar att 0,1 meters skjuvning med en skjuvhastighet på 1 meter per sekund och bentonitdensitet på 2 000 kg/m³ ger en initial plastisk töjning i kopparkapseln på 7 procent. En pessimistisk uppskattning av kryptöjningen i kopparkapseln ger resultatet 7,7 procent.

Skjuvning av deponeringshål är en dimensionerande process för kopparmaterialet som ställer krav på en plastisk töjning på 7 procent och en kryptöjning på 7,7 procent.

Osäkerheter

De indata som använts avseende tryckojämnheter i deponeringshålet, orsakade av ojämnt vatteninflöde i deponeringshålet och även fördelning av bentonitens densitet är konservativa och i något fall mycket konservativa (mycket osannolika). Detta leder till att beräkningarna av påkänningarna på kapseln måste inkludera bentonitens plasticitet och därmed blir komplicerade och behäftade med en större osäkerhet.

Vad det gäller beräkning av isostatiska glaciationslaster är dessa konservativa men okomplicerade.

A1.4.3 Material – kopparhöljet, mekaniska egenskaper

Resultaten från krypprovningarna visar att modifieringar av sammansättningen hos den syrefria kopparn måste göras för att få tillfredsställande krypduktilitet /A-16/. En tillsats av 30 ppm fosfor ökar krypduktiliteten och kryplivslängden. För den fosforhaltiga kopparen har svavelhalter i intervallet 6 till 12 ppm och kornstorlekar i intervallet 100 till 800 mikrometer ingen mätbar påverkan på krypduktiliteten. Korrosionsprovning har visat att tillsatsen av fosfor inte ökar kopparmaterialets känslighet för korngränsskorrosion, varken i grundmaterialet eller i svetsat gods /A-17, A-18/.

Kopparmaterialet ska ha låga halter av vissa olösliga grundämnen: bly, tellur, selen och vismut som försprödar koppar. De exakta kraven i detta avseende har hämtats ur materialstandarderna EN 1976 Cu-OFE och EN Cu-OF1. Dessutom ställs krav på vätehalten eftersom väte kan ge upphov till väteförsprödning vid varmförningsprocessernas höga temperaturer.

Utöver grundmaterialet har svetsar utförda med FSW krypprovats. Krypprovningarna har inte visat några större skillnader mellan svetsens och grundmaterialets krypduktilitet och kryplivslängd /A-19, A-20/.

Inga detekterbara skador eller förändringar på kapselmaterialet förväntas uppkomma under kapselns livstid på grund av strålningen från det använda bränslet. Strålningspåverkan på kopparmaterialet kan därför försummas vid dimensionering av kopparhöljet.

När det gäller temperaturens inverkan på kopparmaterialets mekaniska egenskaper visar enaxliga dragprov ett marginellt temperaturberoende i intervallet 0–100 °C med en gradvis sänkning av sträckgräns och brottgräns med temperaturen medan brottförlängning och brottkontraktion inte påverkas. Jämfört med vid rumstemperatur sjunker brottgräns och sträckgräns med 8 procent vid 100 °C. Om temperaturen i stället sänks från rumstemperatur till 0 °C sker motsvarande ökning av brottgräns och sträckgräns.

A1.4.4 Insatsen i slutförvaret

Samtliga faser i förvarets utveckling kommer att ge mekanisk påverkan på insatsen: vattenmättnadsfasen, tempererade/boreala och permafrostfasen, glaciala fasen, samt postglaciala fasen.

Bentonitbuffertens egenskaper påverkar belastningen på kapseln. Det finns två parametrar hos bufferten som bestämmer lastöverföringen i olika situationer: svälltrycket och skjuvhållfastheten. Båda dessa är direkt beroende av vattenmättnadsdensiteten hos bufferten.

Bevätningen av bentonitbufferten under vattenmättnadsfasen förväntas ske så att svälltrycket byggs upp jämnt. Det kan dock inte helt uteslutas att viss ojämnheter erhålles till följd av ojämn bevätning, skillnader i bentonitens densitet eller avvikelser i deponeringshålets geometri.

Det mest ogynnsamma fallet som identifierats under vattenmättnaden innebär att bevätningen sker asymmetriskt så att svälltrycket utvecklas i bufferten vid ena kapseländan och utefter kapselns ena sida vilket ger ett böjmoment på kapseln /A-21, A-14/. Beräkningar visar att bentonitens plastiska egenskaper är begränsande för spänningen i kapseln. Den största böjspänningen i insatsen visar sig ligga under 55 MPa och begränsas av bentonitens plasticitet. Denna spänning är övergående då bevätningen av bufferten blir fullständig.

Det går dock inte att helt uteslutas i nuvarande skede att bentonitdensiteten varierar i deponeringshålet i intervallet 1 950–2 050 kg/m³ och att kapseln är snedplacerad eller lutar i deponeringshålet samt att deponeringshålet har en ogynnsam geometri. Även i dessa pessimistiska fall begränsas den högsta böjspänningen av bentonitens plasticitet till 55 MPa. Denna spänning betraktas som bestående.

Ojämn svällning, under vattenmättnaden eller som är bestående, är en dimensionerande process för insatsen och ger upphov till en böjspänning som pessimistiskt bestämts till 55 MPa.

De laster som kapseln kommer att utsättas för under glaciationsfasen är sammansatta av det hydrostatiska trycket på försvarsdjup, bentonitens svälltryck och islasten. Den högsta isostatiska lasten är pessimistiskt beräknad till 45 MPa.

Den mekaniska påkänningen på kapseln av en skjuvrörelse till följd av postglaciala jordbävningar beror huvudsakligen av buffertens densitet och skjuvplanets läge, men också skjuvhastigheten och storleken hos skjuvrörelsen har signifikant påverkan. Genomförda beräkningar visar att med en buffertdensitet på 2 000 kg/m³ och en skjuvrörelse på 0,1 meter är töjningen i insatsen mindre än en procent /A-22/.

A1.4.5 Material – insatsen, mekaniska egenskaper

Kapselinsatsen tillverkas av segjärn. Materialet i insatsen ska uppfylla kraven i ”EN 1563 grade EN-GJS-400-15U” (Nummer EN-JS1072, SS 07 17-00).

Insatsens stål-kasset, som åstadkommer kanaler för bränsleelementen, tillverkas av stålplåt enligt EN 10025 S355J2G3, SS 14 2172 eller liknande kvalitet med minst samma hållfasthet och duktilitet.

Insatsen kommer att belastas under lång tid. Som komplement till hållfasthetsberäkningarna behöver en tidsberoende mekanisk analys göras. Tidsberoende effekter kan till exempel uppstå genom att segjärnet kryper eller genom andra tidsberoende fenomen.

A1.5 Säkerställa att kriticitet inte uppstår

För hantering och slutförvaringen av använt kärnbränsle tillämpas normala kriterier för säkerhet mot kriticitet. Bränslet kommer att förbli underkritiskt med nuvarande utformning på insatsen /A-23/.

Ett tänkbart tillverkningsfel vid gjutning av insatsen är att mellanväggarna har större avvikelser. Det är av intresse att studera hur sådana avvikelser skulle påverka risken för att kriticitet uppstår. Kompletterande beräkningar kommer därför att genomföras.

A1.6 Liten påverkan på övriga barriärer

Kapseln får inte påverka slutförvarets flerbarriärsystem. De fall där en påverkan på andra barriärer anses vara möjlig är strålningspåverkan och termisk påverkan på bufferten.

Kapseln måste ge tillräcklig stråldämpning för att inte, genom strålningspåverkan, förändra bentonitbufferten eller vattenkemin i närområdet. Strålning kan orsaka radiolys av vatten eller fuktig luft före vattenmättnad. Med de begränsningar som ges av resteffekten, kapselns material och geometri erhålls en ytdosrat < 1 Gy/h vilken inte ger någon påverkan på övriga barriärer.

Vid alltför höga temperaturer påverkas bentonitbufferten negativt. Av detta skäl får inte temperaturen i bentoniten överskrida 100 °C. Detta krav är inte direkt relaterat till kapselutformningen utan beror av flera faktorer; resteffekten i bränslet i kapseln, bergets värmeledningsförmåga och avståndet mellan kapslarna i deponeringstunnlarna.

A1.7 Viktiga parametrar som påverkar kapseln

SKB:s utvecklingsstrategi utgår från att definiera en referensutförning för slutförvarssystemet. Referensutförningen definierar alla väsentliga delar och parametrar i systemet. Genom successiv kunskapsuppbyggnad detaljeras och underbyggs referensutförningen av slutförvarssystemet och toleranserna för olika parametrar kan minskas. I nuvarande läge finns två alternativa platser med olika geologi och med olika parametrar som gör att toleranserna i parametrarna för kapseln måste täcka båda platserna.

Efter platsvalet kommer toleranserna att kunna minskas men först när detaljundersökningar på den valda platsen samt ett flertal utredningar är genomförda, kan dessa parametrar och deras värden fastställas.

Viktiga parametrar i systemet som påverkar de dimensionerande processerna för kapseln finns angivna i tabell A-1.

Tabell A-1. Naturliga och tekniska systemparametrar som är viktiga för kapseln i slutförvaret.

Parametrar i slutförvarssystemet	Påverkan på kapseln	Parametrar för kapseln
Naturliga		
Geografisk placering – tjocklek på isen	Isostatiskt tryck under glaciation.	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under glaciationsfasen.
Förvarsdjup	Isostatiskt tryck efter vattenmättnad.	Tryckhållfasthet.
Vatteninflöde	Tid för vattenmättnad, belastning under vattenmättnadsfasen, varaktighet av belastning under vattenmättnadsfasen.	Varaktighet av spänningstillstånd kopparhölje och insats under vattenmättnadsfasen.
Hydraulisk konduktivitet	Möjlig påverkan på korrosionsprocessen genom påverkan på vattenkemi och/eller att bentoniten delvis kan föras bort.	Koppartjocklek.
Bergspänningar	Risk för spjälkning ger påverkan på håolgeometrin.	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen.
Sprickförekomst frekvens och storleksfördelning	Risk för skjuvning vid postglaciala jordbävningar.	Skjuvbelastning på kapseln.
Tekniska		
Borrteknik (deponeringshål)	Håolgeometri.	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen.
Variation i vattenmättnadsdensitet hos bentoniten	Bestående tryckojämnheter.	Spänningstillstånd hos kapseln efter vattenmättnadsfasen.
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens plastiska egenskaper.	Spänningstillstånd hos kapseln under vattenmättnadsfasen.
	Bentonitens svälltryck, isostatiskt tryck efter vattenmättnad.	Spänningstillstånd hos kapseln efter vattenmättnadsfasen.
	Bentonitens svälltryck, isostatiskt tryck under glaciation.	Spänningstillstånd hos kapseln under glaciationsfasen.
	Bentonitens plastiska egenskaper, lastöverföring vid postglacial jordbävning.	Spänningstillstånd vid jordbävning. Plastisk töjning i kopparhöljet. Spänningstillståndet i insatsen.
	Bentonitens krypegenskaper, lastöverföring efter postglacial jordbävning.	Spänningstillstånd efter postglacial skjuvning. Kryptöjning i kopparhöljet. Relaxationen av spänningar i insatsen.

A1.8 Tillverkning och hantering

Kapseln konstrueras och dimensioneras så att det är möjligt att säkert lyfta och hantera den vid tillverkning, inkapsling, transporter och deponering samt vid ett eventuellt återtag. Kapselns lock är försett med en lyftfläns som är utformad och dimensionerad för lyft med ett specialverktyg.

Gränsvärden för tillåtna belastningar på kapseln under transport kommer att fastställas inom ramen för transportbehållarens säkerhetsredovisning.

Kapseln dimensioneras inte för de extrema påfrestningar som kan uppstå i samband med missöden under drifttiden. Tre fall av missöden i inkapslingsanläggningen har undersökts och resultaten visar att kapseln inte tål att tappas från full arbetshöjd. Motsvarande missödesanalys i slutförvaret pågår. Kapseln dimensioneras inte för denna typ av missöden. I stället ska de system och processer som används vid inkapsling, transport och deponering utformas så att en acceptabel risknivå erhålls.

A1.8.1 Hantering vid tillverkning, inkapsling, transporter och deponering

Det övergripande kravet är att kapseln och dess delar ska tillverkas och hanteras så att de uppfyller de krav som anges i konstruktionsförutsättningarna när de lämnar kapselfabriken. De specifikationer som säkerställer detta anges i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkningen /A-2/.

I den planerade verksamheten i inkapslingsanläggningen kommer kapseln att lyftas två gånger i locket. Därefter sker transport till slutförvarsanläggningen, kapseln lyfts ur transportbehållaren och hanteras vidare i slutförvarssystemet där ytterligare två lyft sker. En kontrollberäkning av lyftsäkerheten enligt tillämpbara kärntekniska normer har genomförts. Resultaten visar att lyftsäkerheten för kapseln har mycket stora marginaler och att upp till 100 lyft kan ske utan risk.

Hantering, inkapsling, transport och deponering av kapseln ska ske så att belastningarna på kapseln inte ger upphov till skador på kapseln. Om skador uppstår måste de utvärderas med hänsyn till kapselns långsiktiga säkerhet men också till hanteringssäkerhet och efterföljande processteg.

A1.8.2 Skador hos den förslutna kapseln

Hanteringsskador i den färdiga kapselns kopparhölje kommer att förekomma. Hanteringsskador kan bestå av ojämnheter i kopparytan och/eller kallbearbetningseffekter i materialet. Vid extrema belastningsfall som tappad kapsel kan dock även insatsen skadas.

Hanteringssäkerhet

Försök som har genomförts för att bestämma de brottmekaniska egenskaperna hos koppar visar att materialet är ytterst okänsligt för sprickanvisningar även om det förekommer ytskador. Vid extremt djupa repor i tangentiell riktning kan dock lyftsäkerheten påverkas. En utredning om kapselns lyftsäkerhet visar att en 10 millimeter djup runtomgående skada i svetsen är acceptabel från lyftsäkerhetssynpunkt. Samma kriterium kan konservativt tillämpas för övriga delar av kopparhöljet. Det bör dock påpekas att all utvärdering av skador måste ske med hänsyn tagen till andra samverkande diskontinuiteter.

Skador av typen deformationer ger kallbearbetningseffekter vilket innebär minskad brottöjning i materialet men också deformationshårdnad med ökad hårdhet och brottgräns. Generellt sätt påverkas inte lyftsäkerheten om inte materialet blir så kraftigt plasticerat att godset blir förtunnat. För denna typ av skador kan kriteriet att tillåta skador med upp till 10 millimeters djup konservativt tillämpas.

Långsiktig säkerhet

Förekomsten av skador påverkar inte korrosionen av koppar. Kravet på en minsta koppartäckning på 6 millimeter är därför dimensionerande för tillåtna skador från korrosionssynpunkt. Det faktum att koppars brottmekaniska egenskaper är ytterst okänsliga för sprickanvisningar betyder att begränsade lokala skador inte påverkar kopparhöljets mekaniska integritet. Dock är det av intresse att studera om krypduktiliteten påverkas av plasticeringar. Sådana försök planeras.

A1.9 Referenskapseln – sammanfattande krav

Kraven avseende kapselns utförande och material anges i konstruktionsförutsättningarna där också utgångsmaterialet för kopparhöljet och segjärnet specificeras. Därutöver måste tillägg göras till dessa krav för att uppnå tillräckliga mekaniska egenskaper eller tillverknings- och provningsbarhet.

Utgångsmaterialet som valts för tillverkning av kopparhöljet är ren syrefri koppar som uppfyller standarden EN 1976, Cu-OFE (tabell A-2) eller Cu-OF1 (tabell A-3).

Tilläggskrav i konstruktionsförutsättningarna, relativt de krav som anges i standarden, avser halterna av svavel (S) och fosfor (P) och ställs för att uppnå tillräckliga mekaniska egenskaper hos kopparhöljet. Ytterligare ett tilläggskrav måste ställas på låg vätehalt för att eliminera risken för väteförspredning under värmebehandling. Vid svetsning med EBW ställs krav på låg syrehalt hos kopparkomponenterna. Standardens krav på tillåtna halter av vissa metaller (Cr, Co, Al, Ni) ger nödvändig marginal för att säkerställa att korrosionsegenskaperna hos höljet tillgodoses även med hänsyn till att viss förhöjning av dessa halter tidigare har observerats i svetsgodset vid svetsning med FSW.

När det gäller tillåten kornstorlek kan kravet behöva skärpas, utöver vad som föreskrivs i konstruktionsförutsättningarna, för att tillgodose provbarhet med ultraljud. Arbete pågår för att specificera detta krav.

För att ha marginaler till konstruktionsförutsättningarnas krav är generellt sett kraven i SKB:s specifikationer /A-2/ strängare än de som specificeras i konstruktionsförutsättningarna, se tabell A-4.

SKB har valt att tillverka insatsen i segjärn. För att insatsen ska ha de mekaniska egenskaper, hållfasthet och duktilitet, som är nödvändiga ska materialet i insatsen uppfylla de krav som ges i den europeiska standarden EN 1563 grade EN-GJS-400-15U.

En sammanställning av kraven på materialen för kapselkomponenterna ges i tabell A-5 och A-6.

Tabell A-2. Kemisk sammansättning hos koppar, EN 1976 Cu-OFE.

Element	Cu	Ag	As	Fe	S	Sb	Se	Te	Pb
	%	ppm ^{b)} →							
	99,99 ^{a)}	25	5	10	15	4	3	2	5
Element	P	Bi	Cd	Mn	Hg	Ni	O	Sn	Zn
	ppm ^{b)} →								
	3	1	1	0,5	1	10	5	2	1

^{a)} Inklusiv Ag.

^{b)} Max innehåll.

Tabell A-3. Kemisk sammansättning hos koppar, EN 1976 Cu-OF1.

Element	Cu	Ag	As	Fe	S	Sb	Se	Te	Pb
	remaining	ppm→							
		25 ^{b)}	5 ^{c)}	10 ^{d)}	15 ^{b)}	4 ^{b)}	2 ^{e)}	2 ^{f)}	5 ^{b)}

^{a)} Inklusiv Ag.

^{b)} Max innehåll.

^{c)} Summa av As+Cd+Cr+Mn+Sb ≤ 15 ppm.

^{d)} Summa av Co+Fe+Ni+Si+Sn+Zn ≤ 20 ppm.

^{e)} Summa av Bi+Se+Te ≤ 3 ppm.

^{f)} Summa av Se+Te ≤ 3,0 ppm.

Tabell A-4. Krav på kopparhöljet i konstruktionsförutsättningar samt krav ställda på svetsgods, kapselkomponenter och koppargöt.

Krav i konstruktionsförutsättningar – kopparhölje	Svetsgods	Kapselkomponent	Koppargöt
Cr < 30 ppm	Cr < 30 ppm	KTS001 /A-2/	KTS001 /A-2/
Co < 30 ppm	Co < 30 ppm	KTS001	KTS001
Al < 30 ppm	Al < 30 ppm	KTS001	KTS001
Ni < 30 ppm	Ni < 30 ppm	KTS001	KTS001
O < 30 ppm	O < 30 ppm		O < 5 ppm
S < 12 ppm			S < 8 ppm
30 < P < 100 ppm	30 < P < 100 ppm		30 < P < 70 ppm
		H < 0,6 ppm	H < 0,6 ppm
Kornstorlek < 800 µm	Ev tilläggskrav för OFP	Kornstorlek < 360 µm, KTS002 Ev tilläggskrav för OFP	
Duktilitet > 30 %	Duktilitet > 30 %	> 40 % (100 °C)	
Krypduktilitet > 8 % *	Krypduktilitet > 8 %	Krypduktilitet > 8 % (20–100 °C)	

* Krypning kan ske under vattenmättnad samt vid postglacial skjuvning. Angivet värde gäller vid postglacial skjuvning.

Tabell A-5. Sammanställning av konstruktionsförutsättningar samt detaljerade krav på segjärnsinsatsen.

Funktionskrav	Krav angivna i konstruktionsförutsättningarna /A-1/	Övriga relaterade krav samt kommentarer
Innesluta bränslet	Insatsen ska rymma tolv BWR- eller fyra PWR-bränsleelement. Kanalrörens mått måste minst uppgå till: BWR: 150×150 mm. PWR: 230×230 mm.	Teknisk specifikation KTS011 /A-2/. Ritningsändring på PWR-insatsen pågår. Insatsrörens mått kontrolleras med tolk: BWR: 152×152 mm. PWR: ändring utreds.
Kemisk beständighet	Atmosfären i insatsen ska kunna bytas till > 90 % ädelgas.	Insatsen och stållocket utformas för atmosfärsbyte.
Mekanisk hållfasthet	Insatsen ska motstå påkänningar under vattenmättnadsfasen, bestående belastningar på grund av ojämnt svälltryck i deponeringshålet, isostatiska laster under glaciation samt påkänningar i samband med postglaciala jordbävningar. Dimensionerande är ett yttre övertryck på 45 MPa.	Teknisk specifikation KTS011 /A-2/ anger följande standard: EN 1563 grade EN-GJS-400-15U. Materialstruktur/nodularitet: form V och VI (80 %). Sträckgräns: min 240 MPa (20 °C). Brottgräns: min 370 MPa. Brotttöjning: min 11 % (vidgjutna provstavar), min 7 % (provstavar från insatsen). Excentricitet hos kassetten < 5 mm. Hömradier 15–25 mm.
Försumbar inverkan på övriga barriärer och bränslet	Materialtjocklek enligt referenskapseln.	Kontrollberäkningar visar att referenskapseln innehåller detta krav.
Kriticitet	Insatsen utformas så att den även efter vatteninträngning uppfyller kriterier för säkerhet mot criticitet.	Kontrollberäkningar visar att referenskapseln innehåller detta krav.
Provbarhet	Ska uppfylla krav på provningsbarhet med oförstörande provning av eventuella diskontinuiteter i godset.	Krav på ytfinitet, stagplåtar i kassetten och materialstruktur/nodularitet är under utredning.

Tabell A-6. Sammanställning av konstruktionsförutsättningar samt detaljerade krav för kopparkomponenter och svetsar.

Funktionskrav	Krav angivna i konstruktionsförutsättningarna /A-1/	Övriga relaterade krav samt kommentarer
Kemisk beständighet	Min 6 mm intakt koppartjocklek. Materialsammansättning: Kopparmaterial i kapseln ska uppfylla specifikation för ren koppar med låg syrehalt. Tillåtna föroreningshalter i färdig kopparkomponent: Cr < 30 ppm Co < 30 ppm Al < 30 ppm Ni < 30 ppm O < 30 ppm.	För att innehålla konstruktionsförutsättningarna väljs standardmaterial som uppfyller följande specifikationer: EN 1976 Cu-OFE (UNS C10100) eller EN 1976 Cu-OF1 med tilläggskrav enligt KTS001: O < 5 ppm.
Mekanisk beständighet	Mekaniska egenskaper hos koppar: Duktilitet: > 30 %. Krypduktilitet: > 8 %, leder till krav på Kornstorlek: < 800 µm. Tilläggskrav: P = 30–100 ppm S < 12 ppm	I KTS002* anges följande krav avseende färdig komponent: Duktilitet > 40 %. Krypduktilitet > 10 %. Mikrostruktur med kornstorlek < 360 µm. Tilläggskrav enligt KTS001: P = 30–70 ppm (krypduktilitet) S < 8 ppm (svavelutskiljning) H < 0,6 ppm (väteförspredning vid varmförning).
Försumbar inverkan på övriga barriärer och bränslet	Materialtjocklek enligt referenskapseln.	
Transporteras, deponeras och i övrigt hanteras på ett säkert sätt	Koppartjocklek: erforderlig tjocklek för tillräcklig lyftsäkerhet. Kopparhöljet ska vara tillverkningsbart och att ställda krav uppfylls ska kunna verifieras.	Lyftsäkerheten för kapsel med 4 cm koppartjocklek är kontrollberäknad.
Provarbarhet	Ska uppfylla krav på provningsbarhet med oförstörande provning av eventuella diskontinuiteter i godset.	Speciellt avses ultraljuddämpning i materialet och ytfinhet. Specifikationer för mikrostruktur (t ex kornstorlek) och ytfinhet utreds. Kontroll med OFP, rengöring: eventuella krav på ytfinhet är under utredning.

* Kraven i KTS överstiger motsvarande i konstruktionsförutsättningarna och kravet på kornstorlek är under utredning (rör provbarhet med ultraljud).

A1.10 SKB:s fortsatta arbete med konstruktionsförutsättningar för kapseln

För att utarbeta de slutliga konstruktionsförutsättningarna för kapseln återstår en del arbete. Underlagen måste struktureras och kompletteras så att de innehåller den information som krävs för att säkerställa kapselns funktion och tillgodose myndigheternas behov vid granskning. Inför ansökan om slutförvaret arbetar SKB vidare med att ta fram konstruktionsförutsättningar och dimensioneringsunderlag i enlighet med de krav som anges i bland annat i SKI:s utredningsrapport 2006/109 /A-23/.

Programmet för det fortsatta arbetet finns i avsnitt 14.2 i del III.

Förkortningar

Abaqus	Finita-element-datorkod som används för THM-modellberäkningar.
ADS	Accelerator drivet system.
AE	Akustiska emissioner.
AECL	Atomic Energy of Canada Ltd, Kanada.
Amber	Datorkod för säkerhetsanalys (biosfären).
AMF	Assessment flow model.
Andra	Agence National Pour la Gestion des Dechets Radioactifs, Frankrike.
Apse	Experiment i Äspölaboratoriet, Pelarförsöket eller Äspö pillar stability experiment.
ASAR	As-operated Safety Analysis Report. Återkommande helhetsbedömning av säkerheten i en kärnteknisk anläggning.
ATB	Strålskärmda transportbehållare för radioaktivt avfall.
Baclo	Samarbetsprojekt mellan SKB och Posiva. Utveckling, test och demonstration av återfyllning och förslutning i ett slutförvar.
BAM	Bundesanstalt für Materialprüfung, Tyskland.
BBM	Barcelona basic model. Elastoplastisk modell.
BET	Adsorptionsisoterm som beskriver adsorption i multilager.
Bevis	EU-projekt som ska ta fram nya förslag till vattenskyddsåtgärder i Östersjöns största skärgårdsområde (Åbolands, Ålands och Stockholms skärgårdar).
BFA	Bergrum för avfall på Simpevarpshalvön.
Big Bertha	Fullskaleförsök för KBS-3H, utsvällning av bentonit ur supercontainer.
Biopath	SKB:s datorkod för radionuklidtransport i biosfären.
Bioprotä	Internationellt projekt om biosfärsaspekter på bedömningen av djupförvarets långsiktiga säkerhet.
Bips	Borehole image processing system.
BLA	Bergrum för lågaktivt avfall i SFR 1.
BMA	Bergrum för medelaktivt avfall i SFR 1.
BMT	Benchmark test.
BTF	Betongtankförvar i SFR 1.
BWR	Boiling water reactor. Kokarvattenreaktor.
CAD	Computer aided design. Datorstödd design.
Calixpart	EU-projekt. Cluster Partition, Selective extraction of minor actinides from high activity liquid waste by organised matrices.
CBI	Cement och betong institutet. Industriforskningsinstitut.
CCC	Critical coagulation concentration. Kritisk koaguleringskoncentration.
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique.
CEC	Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet.
CEN	Europeiska standardiseringskommittén.
CFM	Colloid formation and migration project at the Grimsel test site.
Chemlab	Sond för radiokemiska undersökningar i borrhål, Äspölaboratoriet.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Code Bright	Datorkod för termo-hydro-mekaniska beräkningar.
Collage II	SKI:s kolloidtransportmodell.
Colloid	Experiment i Äspölaboratoriet, Kolloidprojektet.
Comp23	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet.
Compulink	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet (ersätter Comp23).

Confirm	EU-projekt. Cluster Feutra, Collaboration on nitride fuel irradiation and modelling.
Connectflow	Datorkod för grundvattenflödesberäkningar.
Coup	Datorkod som hanterar transpiration, tillväxt och näringsupptag för vegetation.
Crud	Chalk river unidentified deposits. Ytkontamination.
CTH	Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
DarcyTools	Datorkod för grundvattenflödesberäkningar.
Decovalex	Internationellt projekt. International co-operative project for the Development of Coupled models and their Validation against Experiments in nuclear waste isolation.
DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverksmodell.
Dinsar	Differential radar interferometry.
EBS	Engineered barrier system. Tekniska barriärer.
EBW	Electron beam welding. Elektronstrålesvetsning.
EC	European commission. Europeiska kommissionen.
Ecopath	Generellt ekologiskt modellpaket.
EDZ	Engineering disturbed zone. Störd zon i berget runt bergutrymmen.
Efta	Europeiska frihandelssammanslutningen.
Eikos	Probabilistiskt modellverktyg för dosberäkningar i biosfären.
Emras	IAEA-projekt. Environmental modelling for radiation safety.
Enresa	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Spanien.
Equip	EU-projekt. Evidences from quarternary infillings for palaeohydrology.
Erica	EU-projekt. Environmental Risk from Ionising Contaminants.
Esdred	EU-projekt. Engineering studies and demonstrations of repository desings.
EU	European Union. Europeiska unionen.
Europart	EU-projekt. European research programme for partitioning of minor actinides within high active wastes issuing from the reprocessing of spent nuclear fuels.
Eurotrans	EU-projekt. European project on transmutation.
Examine3D	Datorkod för bergmekaniska analyser.
Farf31	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet (Proper-delmodul).
Farf33	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet som kan hantera kolloider.
Febex	Full-scale high level waste engineered barriers experiment, Grimsel, Schweiz.
FE	Finita elementmetoden (FE), en numerisk metod för att lösa partiella differentialekvationer.
Fep	Feature, events and processes.
F-faktor	Transportmotstånd.
FHA	Framtida mänskliga handlingar.
Flac3D	Datorkod för bergmekaniska analyser.
FoU	Forskning och utveckling.
FPAR	Fraction of photosynthetically active radiation.
Fracod	Datorkod för bergmekaniska analyser.
FSW	Friction stir welding. En typ av friktionssvetsning.
Fud	Forskning, utveckling och demonstration.
Fud-K	Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningskedet, 2000.
Funmig	EU-projekt. Fundamental processes of radionuclide migration.
Futurae	EU-projekt. Assessment and management of the impact of radio-nuclides on man and the environment.
GEN-IV	Internationellt forum för utveckling av fjärde generationens kärnreaktorer.
Geus	Danmarks och Grønlands Geologiska Undersøgelse.
Gia	Glacial isostatic adjustment.
Gis	Geografiskt informationssystem.

GPS	Navigation satellite timing and ranging global positioning system. System för satellitnavigering.
Holocen	Innevarande mellanistid som började för omkring 11 500 år sedan.
HRL	Hard rock laboratory.
HTGR	High-temperature gas-cooled reactor technology.
HTO	Tritierat vatten.
HWC	Hydrogen water chemistry.
IAEA	International Atomic Energy Agency.
Icem	Conference on environmental remediation and radioactive waste management.
iConnect Club	Integrated continuum and network approach to groundwater flow and contaminant transport.
ICRP	International Commission on Radiological Protection.
IEMS	International Environmental Seminar.
IKA	Radioaktivt icke kärntekniskt avfall.
in situ	Latin för ”på plats”.
INE-FZK	Institut für Nukleare Entsorgungstechnik im Forschungszentrum Karlsruhe.
IPCC	Intergovernmental panel on climate change.
IPLU	Inledande platsundersökning.
IRPA	International Radiation Protection Association.
ISO	Internationella standardiseringsorganisationen.
ISO 14001	Internationell kvalitetsstandard, miljöledningssystem.
ISO 9001	Internationell kvalitetsstandard, kvalitetsledningssystem.
ITU	Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe.
IUR	Internationella Radioekologunionen. International organisation of radioecologists.
IVA	Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien.
JobFem	Datorkod för termomekaniska analyser.
JRC	Joint Research Center.
Kasam	Statens råd för kärnavfallsfrågor.
KBS-3H	Variant av KBS-3, horisontell deponering av kapslarna.
KBS-3-metoden	SKB:s referensmetod för att ta hand om använt kärnbränsle.
KBS-3V	Referensvariant av KBS-3, vertikal deponering med en kapsel i varje deponeringshåll.
Kd	Grundämnesspecifika fördelningskoefficienter.
KPLU	Komplett platsundersökning.
KTH	Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
KTL	Kärntekniklag. SFS 1984:3 Lag om kärnteknisk verksamhet.
KTS 001	SKB:s tekniska specifikation – Copper ingots and billets for canister components.
KTS 002	SKB:s tekniska specifikation – Copper Components for Canisters.
KTS 011	SKB:s tekniska specifikation – Nodular Cast Iron EN 1563 Insert.
LAI	Leaf area index.
Lasgit	Experiment i Äspölaboratoriet, Large scale gas injection test.
LDF	Landscape Dose Factors.
LKO	Lokal kompetensuppbyggnad i Oskarshamn.
Loma	Låg- och medelaktivt avfall.
Lot	Experiment i Äspölaboratoriet, Long term test of buffer material.
LTDE	Experiment i Äspölaboratoriet, Long term diffusion experiment (se LTDE-SD).
LTDE-SD	Experiment i Äspölaboratoriet, Long term sorption/diffusion experiment.
M3	Datorkod för hydrokemiska analyser, Mixing an mass balance modelling.
Marfa	Datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet. Migration analysis for radionuclides in the far field.
Matlab	Kommersiell datorkod för matematiska beräkningar.

MB	Miljöbalk. SFS 1998:808.
Micado	EU-projekt. Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in a nuclear waste repository.
Micomig	Mikrobiella experiment i Äspölaboratoriet, radionuklidmigration.
Micored	Mikrobiella experiment i Äspölaboratoriet, redox potential.
Microbe	Mikrobiella experiment i Äspölaboratoriet.
Mike She	Kommersiellt modelleringsverktyg som används för ytnära hydrologisk modellering.
Minican	Experiment i Äspölaboratoriet, Korrosion av kapselns insats.
Mis 11	Marina syreisotopstadiet 11 som varade under cirka 30 000 år och inträffade för ungefär 400 000 år sedan.
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning.
MKG	Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.
Mox	Mixed oxide fuel.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz.
NDT	Non destructive testing.
NDT Reliability	Forskningsprogram vid BAM för att kartlägga OFP-metodernas tillförlitlighet.
NEA	Nuclear Energy Agency, Paris.
NF-Pro	EU-projekt. Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies.
Nirex	Nirex Ltd.
NKS	Nordiskt kärnsäkerhetssamarbete.
Numo	Waste management organisation of Japan.
NWC	Normal water chemistry.
OECD/NEA	Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency.
OFP	Oförstörande provning.
OKG	Oskarshamnsväktets kraftgrupp.
Onkalo	Underjordisk forskningsanläggning i Olkiluoto i Finland.
OPG	Ontario Power Generation.
Origen-S	Datorkod för beräkning av radionuklidinnehåll, resteffekt och strålning i använt kärnbränsle.
P&T	Partitioning and transmutation.
Padamot	EU-projekt. Palaeohydrogeological data analysis and model testing.
Pandora	SKB:s och Posiva:s modellverktyg för dosberäkningar i biosfären.
Particle Flow Code	Datorkod för bergmekaniska analyser.
Partnew	EU-projekt. Cluster Partitioning, New solvent extraction processes for minor actinides.
PASS	SKB:s projekt alternativstudier för slutförvar.
PFC	Particle flow code. Datorkod för bergmekaniska analyser.
Phreeqc	Datorkod för kopplade geokemi- och transportanalyser.
PLC	Styrsystem för de mekaniska delarna i OFP-systemen. Programmable logic controller.
POD	Probability of detection.
Posiva	Posiva Oy.
Precci	Research program on the long term evolution of spent fuel waste packages, CEA, France.
Prism	Datorkod för probabilistiska beräkningar av radionuklidtransport i biosfären.
Protect	EU-projekt. An evaluation of the practicability and relative merits of different approaches to protection of the environment from radiation.
PSAR	Preliminär säkerhetsredovisning.
PSI	Paul Scherrer Institute, Schweiz.
PSS	Hydrogeologiskt mätsystem. Pipe string system.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor.

Pyrorep	EU-projekt. Cluster Partition, Pyrometallurgical processing research programme.
Retrock	EU-projekt. Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments.
Rex	Experiment i Äspölaboratoriet. Redox experiment in detailed scale.
RH	Relative humidity. Relativ fuktighet.
Rixs	Resonant inelastic X-ray scattering.
RNR	Experiment i Äspölaboratoriet. Radionuclide retention experiment.
RoCS	Experiment i Äspölaboratoriet. Rock characterisation system.
RU	Referensutformning.
RVS	Rock visualisation system. Verktyg för geometrisk modellering, administration och presentation av platsbeskrivande modeller.
S&T	Separation och transmutation. (P&T på engelska)
SAR	Säkerhetsredovisning.
SAR	Synthetic aperture radar.
SAT	Site acceptance test.
SCK-CEN	Belgian Nuclear Research Centre.
SDM	Site descriptive model. Platsbeskrivande modell.
SER	Site engineering report. Ingenjörsgelogisk beskrivning.
SF	Slutförvar för använt kärnbränsle.
SFL	Slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall.
SFR	Slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall.
SFR 1	Slutförvar för radioaktivt driftavfall.
SFR 3	Slutförvar för radioaktivt rivningsavfall.
SFS	EU-projekt. Spent fuel stability under repository conditions.
SGU	Sveriges geologiska undersökning.
Sicada	SKB:s databas för insamlade data från platsundersökningar.
Simfuel	Urändioxid som innehåller icke-radioaktiva fissionsproduktlement och metallpartiklar liknande de i använt bränsle.
Simulink	Kommersiell datorkod för matematiska beräkningar.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB 91	SKB-projekt. Betydelsen av berget för KBS-3-förvarets långsiktiga säkerhet, 1992.
SKI	Statens kärnkraftinspektion.
SLU	Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
SNS	Svenska nationella seismiska nätet.
SR 95	SKB-projekt, mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel, 1996.
SR 97	SKB-projekt, säkerheten efter förslutning av djupförvaret, 1999.
SR-Can	Redovisning av slutförvarets säkerhet på lång sikt (publicerad av SKB i november 2006).
SR-Site	Redovisning av slutförvarets säkerhet på lång sikt. Ska tas fram av SKB som underlag till ansökan om att bygga slutförvaret.
SSE	Site sensitive emulsion. Emulsionssprängämne.
SSI	Statens strålskyddsinstitut.
STF	Säkerhetstekniska driftförutsättningar.
SveBeFo	Stiftelsen svensk bergteknisk forskning.
Swebrec	Swedish Blasting Research Centre. Kompetenscentrum för detonik och sprängteknik vid Luleå Tekniska Universitet.
Swiw	Single well injection withdrawal tracer test.
TBM	Tunnel boring machine.
TBT	Experiment i Äspölaboratoriet. Temperature buffer test.
TDB	OECD/NEA-projekt. Thermodynamic data bases.
Tensit	SKB:s datorkodpaket för numeriska beräkningar av radionuklidtransport.
TF EBS	Äspö Task Force on Engineered Barrier Systems.

TF GWFS	Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes.
THM	Termo-hydro-mekanisk.
THMC	Termisk-hydraulisk-mekanisk-kemisk.
TMS	Tunnel mapping system. System för karakterisering av tunnlar.
TOFD	Time-Of-Flight-Diffraction. Teknik för OFP.
TRL	Provningsmetod för oförstörande provning med ultraljud. Transmitter Receiver Longitudinal.
True	Experiment i Äspölaboratoriet. Tracer retention understanding experiments.
TSX	Internationellt projekt – Tunnel Sealing Experiment i URL i Kanada.
TWI	The Welding Institute, Cambridge, England.
TWI	Topografiskt våtindex.
URL	Underground Rock Laboratory.
Wave	Datorkod för bergmekaniska analyser.
VLJ	Slutförvaret av låg- och medelaktivt avfall (VLJ-bergrum) i Olkiluoto, Finland.
WP	Work package.
WP-Cave	Förvarsutformning för geologisk deponering.
Xanes	X-ray absorption near edge structures.
XAS	X-ray absorption spectroscopy.
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy.
Återtagsförsöket	Experiment i Äspölaboratoriet. Friläggning och återtag av kapsel i deponeringshål i ett KBS-3-förvar.
α -strålning	Alfastrålning.
β -strålning	Betastrålning.
γ -strålning	Gammastrålning.
1D	Endimensionell.
2D	Tvådimensionell.
3D	Tredimensionell.
3Dec	Datorkod för bergmekaniska analyser.

