

Fud-program 2010

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

September 2010

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



Fud-program 2010

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

September 2010

Förord

SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, som ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken 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 utvecklingsverksamhet som behövs för att hantera och slutförvara avfallet på ett säkert sätt samt för att avveckla och riva kärnkraftverken. SKB presenterar nu Fud-program 2010 för att uppfylla dessa krav.

Efter mer än 30 års forskning och utveckling när det gäller slutförvaring av använt kärnbränsle färdigställs nu en ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken för KBS-3-systemet. Platsundersökningarna är avslutade och SKB valde i juni 2009 Forsmark som plats för slutförvaret. Under 2006 presenterade vi SR-Can-rapporten i vilken vi redovisade en första analys av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar vid platserna Forsmark och Laxemar, baserad på data från den inledande platsundersökningsfasen. Rapporten gav ansvariga myndigheter tillfälle att granska metodiken för säkerhetsanalysen. SKB har nu tagit hand om de kommentarer som redovisades i granskningen. Säkerhetsanalysen för slutförvaret i Forsmark kommer att vara ett viktigt underlag till ansökningarna. Hur vi har hanterat granskningskommentarer som SSM lämnade på Fud-program 2007 beskrivs i detta Fud-program.

SKB har nu en tillräcklig vetenskaplig och teknisk kunskapsbas för att kunna lämna in ansökningarna. Metodik för analys av den långsiktiga säkerheten är långt utvecklad. Kvalificerade säkerhetsanalyser kommer även fortsättningsvis vara en integrerad del av Kärnbränsleprogrammets genomförande. För att fördjupa vår förståelse och minska osäkerheterna i analysen kommer vi i vårt forskningsprogram att under den närmaste tiden särskilt satsa på några nyckelfrågor såsom korrosion av koppar samt processer som kan komma att påverka buffertmaterialet.

Teknikutvecklingen har nu nått så långt att vi anser oss ha genomförbara tekniska lösningar för slutförvarets olika delar. Genom demonstrationer vid våra laboratorier har vi i full skala visat att vi klarar de olika stegen från att tillverka och deponera kapslar till att försluta tunnlarna. Vi anser nu att det är rätt tidpunkt att gå vidare till nästa skede i Kärnbränsleprogrammet och efter vederbörlig tillståndsprövning inleda själva byggandet av anläggningarna i KBS-3-systemet. Redovisning av hur planen ser ut för att genomföra arbetet med att uppföra systemet har tidigare beskrivits i våra Fud-program. I och med att SKB lämnar in ansökningarna blir denna så kallade genomförandeplan en tillståndsfråga som kommer att hanteras inom tillståndsprövningen.

Regeringen meddelade i sitt beslut om Fud-program 2007 krav på kompletterande redovisning avseende planering av delar i Loma-programmet (låg- och medelaktivt radioaktivt avfall). Kompletteringar redovisades i mars 2009 och programmet vidareutvecklas i detta Fud-program.

SKB planerar att lämna in ansökan om att få bygga ett slutförvar för långlivat drift- och rivningsavfall cirka år 2030.

I och med regeringens beslut att driften av den andra av de två reaktorerna vid Barsebäck skulle upphöra den 31 maj 2005 fick frågan om rivning av kärnkraftsanläggningar ökad aktualitet. SKI angav i sitt yttrande över Fud-program 2004 att SKB borde intensifiera arbetet med rivningsfrågor samt utreda den kortaste tid som skulle krävas för att en tillståndsprocess för slutförvaring av rivningsavfall skulle kunna påbörjas. SKB har därefter initierat ett projekt med syfte att bygga ut SFR för att där slutförvara både drift- och rivningsavfall. Drifttillståndet för SFR omfattar i dag endast driftavfall. Bergundersökningar har genomförts och projektering av utbyggnaden pågår. Vi planerar att lämna in ansökningar enligt kärntekniklagen och enligt miljöbalken för den utbyggda anläggningen under 2013 och att ta anläggningen i drift 2020.

Vi befinner oss nu i ett skede där vi ska börja omsätta resultat från många års forskning, utveckling och demonstration till praktisk tillämpning och industriella processer i nya anläggningar. SKB:s organisation kommer att anpassas för att möta de krav detta ställer på ny kompetens, kompetensöverföring och vidareutvecklad arbetsmetodik med fokus på kvalitets- och säkerhetsfrågor.

Att bibehålla och öka samhällets förtroende och aktiva stöd kommer att vara avgörande för det fortsatta arbetet och kräver stora mått av uthållighet och kontinuitet i vårt arbete.

Stockholm i september 2010
Svensk Kärnbränslehantering AB



Claes Thegerström
VD



Tommy Hedman
Chef, Avdelning Teknik

Sammanfattning

Fud-program 2010 redogör för SKB:s planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2011–2016. SKB:s verksamhet är indelad i två huvudområden – programmet för låg- och medelaktivt avfall (Loma-programmet) och Kärnbränsleprogrammet. Driften av befintliga anläggningar sker inom Driftprocessen.

Fud-program 2010 består av fem delar:

- Del I Övergripande handlingsplan
- Del II Loma-programmet
- Del III Kärnbränsleprogrammet
- Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet
- Del V Samhällsvetenskaplig forskning

Fud-program 2007 var främst inriktat på teknikutveckling för att realisera slutförvaret för använt kärnbränsle. De insatser som beskrevs syftade till att öka kunskapen om den långsiktiga säkerheten och till att få fram tekniskt underlag för ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret för använt kärnbränsle och ansökan enligt miljöbalken för slutförvarssystemet. Många viktiga resultat från dessa insatser redovisas i detta program. Den samlade redovisningen av resultaten kommer i ansökan som lämnas in i början av år 2011.

I myndigheternas granskning av Fud-program 2007 och kompletteringen av programmet efterlystes förtydliganden av planer och program för slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, och för slutförvaret för långlivat avfall, SFL. Detta Fud-program beskriver dessa planer på ett tydligare sätt.

Nedan följer en sammanfattning av innehållet i respektive del.

Del I Övergripande handlingsplan

SKB:s handlingsplan beskriver de principer för hanteringen av radioaktivt avfall som utgör grund för utformningen av våra anläggningar. Planeringen för de olika delarna i kärnavfallssystemet styrs av olika förutsättningar, till exempel det använda kärnbränslets egenskaper, mängder och typer av avfall samt drifttider för reaktorerna.

Inom Loma-programmet pågår platsundersökningar och förprojektering för utbyggnaden av SFR. Utbyggnaden behövs för att ge plats åt kortlivat rivningsavfall från kraftverken och övriga kärntekniska anläggningar. Det långlivade avfallet från rivningen kommer enligt våra planer att slutförvaras i SFL.

I juni 2009 valde SKB Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret. Arbetet pågår med att färdigställa underlagen till ansökningarna om uppförande av KBS-3-systemet. Dessa kommer att lämnas in till SSM i början av år 2011. I vår planering räknar vi med att påbörja uppförande av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen under 2015 respektive 2016 samt att under 2025 inleda provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink som blir namnet på anläggningen när Clab och inkapslingsanläggningen har integrerats.

Våra forsknings- och utvecklingslaboratorier; Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet kommer fortsatt ha viktiga roller både i vårt forsknings- och teknikutvecklingsarbete och för att träna personal och för att demonstrera teknik.

SKB:s planering baserar sig på 50 års drift av reaktorerna i Forsmark och Ringhals och 60 års drift av reaktorerna i Oskarshamn. Dessa tider är viktiga förutsättningar i vår planering och medför att förvaret beräknas vara förslutet om cirka 75 år. Förutsättningarna för planeringen kommer med all sannolikhet att ändras. SKB tar detta i beaktande och planerar därför för ett visst mått av flexibilitet i utformningen av anläggningar och system.

Om nuvarande reaktorer ersätts med nya ändras förutsättningarna för SKB:s planering väsentligt. Vi presenterar en analys av vad detta skulle innebära med avseende på volymer avfall, behov av mellanlagringskapacitet och konsekvenser för slutförvarens storlek. Nya reaktorer innebär längre drifttider och att vissa av de befintliga anläggningarna behöver byggas ut.

Del II Loma-programmet

Loma-programmet omfattar allt låg- och medelaktivt avfall som ska slutförvaras i SKB:s anläggningar inklusive avveckling och rivning av de svenska reaktorerna och SKB:s anläggningar. Förutom avfallet från de svenska kärnkraftverken ingår också avfall från Studsvik Nuclear AB, AB SVAFO och Westinghouse Electric Sweden.

Handlingsplan för genomförande av Loma-programmet

SKB planerar att bygga ut SFR för att kunna omhänderta rivningsavfall och ytterligare driftavfall som kommer av förlängda planerade drifttider av kärnkraftverken. Utbyggnaden av SFR dimensioneras för att kunna omhänderta allt tillkommande kortlivat låg- och medelaktivt driftavfall samt allt kortlivat rivningsavfall som bedöms uppstå vid rivningen av dagens kärnkraftverk, inklusive Ågestareaktorn och forskningsreaktorerna vid Studsvik. Vid dimensioneringen av SFR tas även hänsyn till rivningsavfall från Clink och ytterligare avfall från SVAFO och Studsvik, i vilket avfall från sjukhus, forskning och industri ingår.

Vi planerar att bygga ut SFR i etapper och utbyggnaden kommer att utföras så att utrymme alltid finns för rivningsavfall från kärnkraftverken i enlighet med kärnkraftsföretagens avvecklingsplanering.

En stor del av det långlivade avfallet från kärnkraftverken uppstår i samband med att dessa rivs, men långlivat avfall uppstår även under driften i samband med att reaktorernas interna delar byts ut. Studsvik Nuclear AB och AB SVAFO har också långlivat låg- och medelaktivt avfall med ursprung från bland annat forskning och utveckling. SKB planerar för att mellanlagra långlivat avfall i SFR. Vi bedömer att en realistisk tidpunkt för att lämna in ansökan om att bygga slutförvaret för långlivat avfall, SFL, är cirka år 2030. Ett antal viktiga milstolpar måste passeras fram tills dess, såsom val av förvarskoncept och plats, undersökningar, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar etc. Vi kommer också att utreda möjligheten att i framtiden omkonditionera avfallet för en effektivare slutförvaring. När det gäller val av plats för SFL så kommer vi att behöva genomföra utredningar som beaktar både resultat från de platsundersökningar som SKB genomfört i Oskarshamn och i Forsmark och behoven av att välja någon annan plats. I ett sådant arbete kommer vi att göra bedömningar om vilka krav som det förvarskoncept vi valt att gå vidare med ställer på berget och dess egenskaper. Eftersom dessa insatser ligger långt fram i tiden redovisar vi inte någon detaljerad tidsplan.

Milstolpar i Loma-programmet

Milstolpar för hantering av kortlivat drift- och rivningsavfall:

- Platsundersökningar för utbyggnaden av SFR avslutas år 2011.
- Ansökningarna om utbyggnad av SFR lämnas in år 2013.
- Utbyggnaden av SFR startar år 2017.
- Ansökan om rutinmässig drift av utbyggt SFR lämnas in år 2020.

Milstolpar för hantering av långlivat drift- och rivningsavfall:

- Ansökan om licensiering av avfallstransportbehållare, ATB 1T, lämnas år 2012.
- Mellanlagring av hårdkomponenter i SFR inleds år 2020.
- Säkerhetsanalys för SFL redovisas år 2016.
- Ansökan om att ta SFL i drift lämnas in cirka år 2030.

Forskning och teknikutveckling för Loma-programmet

SFR

Planeringen av den slutliga utformningen av utbyggnaden av SFR genomförs både för försvarsdelar för lågaktivt avfall och för medelaktivt avfall. Vi kommer att utreda hur barriärerna i de utbyggda försvarsdelarna ska utformas. Utgångspunkten är att det lågaktiva avfallet placeras i försvarsutrymmen av samma typ som BLA, bergsal för lågaktivt avfall. För det medelaktiva avfallet behövs barriärer som begränsar grundvattenflödet. Strategier för förslutning av både den befintliga delen av SFR och för den utbyggda delen kommer att tas fram. Detta arbete kommer att vara underlag för den säkerhetsanalys som färdigställs år 2013.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL

Under den kommande treårsperioden kommer vi att fokusera utvecklingsarbetet på att genomföra en konceptstudie för slutförvaret för långlivat avfall. Syftet med studien är att så småningom välja möjliga koncept, som sedan kan utvärderas i den säkerhetsanalys som ska redovisas år 2016. SKB har påbörjat forsknings- och utvecklingsarbeten för SFL inom följande områden:

- Åldersförändringar hos cementbaserade material.
- Korrosion av metaller i försvarsmiljö.
- Nedbrytning av organiskt avfall i cementmiljö.
- Gaspermeabilitet hos betong och cement.

Ansvar, planering och teknik för avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar

Planeringen av avveckling och utförande av rivningsarbeten ska genomföras i samarbete mellan kärnkraftsföretagen och SKB. Huvudansvaret ligger på tillståndshavaren för kärnkraftsreaktorn som svarar för planering, tillståndsfrågor och genomförande av den fysiska rivningen samt för behandling av avfallet. SKB medverkar i arbetet med utveckling av generella metoder och rutiner för rivningsarbetet, aktivitetsmätning och klassificering av avfall. Vi bevakar också den internationella utvecklingen inom avvecklingsområdet. Samordning mellan kärnkraftsföretagen och SKB sker i den industrigemensamma Rivningsgruppen.

Avvecklingen av Ågestareaktorn och hanteringen av avfall från rivningen finansieras i enlighet med Studsvikslagen (1988:1597). Vattenfall innehar det kärntekniska tillståndet för verksamheten för Ågesta. Vattenfall och SVAFO ansökte vintern 2009/2010 om att SVAFO ska överta det kärntekniska tillståndet från Vattenfall.

I detta Fud-program finns sammanfattningar av kärnkraftsföretagens avvecklingsplaner (inklusive Ågesta). Avsnittet beskriver också planeringen för avveckling av SKB:s kärntekniska anläggningar.

Barsebäck

Rivningen av reaktorerna i Barsebäck planeras starta år 2020. Barsebäck Kraft AB kommer att genomföra studier, samt analysera och dra nytta av internationella erfarenheter på området.

Forsmark

Forsmarks Kraftgrupp AB:s mål för avvecklingen är att återställa anläggningen till en friklassad anläggning. FKA planerar att uppdatera sin avvecklingsplan under år 2010. Behovet av uppdateringen beror till största delen på slutsatserna i de pågående blockspecifika rivningsstudierna.

Oskarshamn

Målsättningen för OKG Aktiebolag är att uppnå en friklassad anläggning utan restriktioner för användning av byggnader och mark. Olika avvecklingsalternativ har studerats men valet av strategi kommer inte att göras förrän närmare den slutliga avställningen av anläggningarna. När pågående

blockspezifika rivningsstudier för Oskarshamnsverken är färdigställda kommer dessa att utgöra en grund för att uppdatera avvecklingsplanen, vilket är planerat under år 2011.

Ringhals

Ringhals AB har som mål för avvecklingen att avlägsna radioaktivt material och återställa anläggningen till en friklassad anläggning. Strategin för rivningen innebär att huvuddelen av arbetet genomförs fem år efter slutlig avställning. Vidare förutsätts att det närliggande blocket är avställt. Ringhals AB:s pågående blockspezifika rivningsstudier kommer att utgöra grunden för en uppdatering av den preliminära avvecklingsplanen under 2010–2011.

Ågesta

Ågestaanläggningen är för närvarande i servicedrift. Servicedriften planeras fortsätta fram till dess att rivning startar, tidigast år 2020 då gällande miljötillstånd går ut. En preliminär avvecklingsplan för anläggningen har tagits fram.

Ågestas rivningsstudie kommer att uppdateras och blir klar under 2011 liksom en ansökan om friklassning av områden utanför inneslutningen i Ågesta.

Del III Kärnbränsleprogrammet

Planeringen för uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret kommer att beskrivas i den redovisning som lämnas i ansökningarna enligt kärntekniklagen respektive miljöbalken i början av 2011. I ansökansunderlaget kommer teknikutvecklingsbehov att redovisas i fullständig form.

Huvudskeden och tidsplan

Kärnbränsleprogrammet innefattar tillståndsprovning, projektering, uppförande och driftsättning av inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle.

Viktiga förutsättningar både för ansökningarna och för det fortsatta arbetet är:

- Totalt cirka 6 000 kapslar hanteras och slutförvaras. Det motsvarar 50 års drift av reaktorerna i Forsmark och Ringhals och 60 års drift av reaktorerna i Oskarshamn.
- Vid rutinmässig drift är deponeringstakten 150 kapslar per år. Systemet dimensioneras för en deponeringskapacitet på maximalt 200 kapslar per år.
- Vald referensutförning är KBS-3 med vertikal deponering i ett slutförvar på cirka 500 meters djup.
- Inkapslingsanläggningen uppförs i anslutning till mellanlagret Clab och de båda anläggningarna ska drivas som en integrerad anläggning benämnd Clink.
- Kärnbränsleförvaret förläggs till Forsmark och utformas med anpassning till den berggrund och de förhållanden i övrigt som råder på platsen.
- Driften av systemet ska starta så tidigt som möjligt, dock med realistiska tidsplaner för tillståndsprocess, teknikutveckling, uppförande och driftsättning.

Ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra inkapslingsanläggningen och att få inneha och driva den som en integrerad anläggning, Clink, med Clab lämnades in 2006. En komplettering till ansökan lämnades in under 2009. Driften av Clab kommer att fortgå under hela uppförandet av inkapslingsanläggningen. Den fysiska sammankopplingen av anläggningarna kommer att ske när inkapslingsanläggningen är färdigbyggd och nödvändiga ändringar är genomförda i Clab.

Valet att förlägga Kärnbränsleförvaret till Forsmark innebär att planeringen för uppförande och drift av förvaret går in i en ny fas. Teknikutvecklingen inriktas på att ta fram lösningar som uppfyller krav på säkerhet och funktionalitet för de förhållanden som råder i Forsmark. Parallellt med tillståndsprovningen kommer SKB att gå vidare med projekteringen av Kärnbränsleförvaret.

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av slutförvarsanläggningen. Som en del i projektering och byggande av anläggningen görs omfattande bergundersökningar (detaljundersökningar). Driftsättningen av slutförvarets delsystem sker i takt med att systemen byggs och installeras. Vid driftsättningen provas systemen, först vart och ett för sig och sedan gradvis mera sammankopplade. Samtidigt som anläggningens delar driftsätts byggs driftorganisationen upp, utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrimningen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning, som innebär att hela anläggningen provas under driftsmässiga förhållanden. Det övergripande målet för uppförande och driftsättning är att vi kan ansöka om att få ta slutförvarsanläggningen i drift. För att det ska vara möjligt måste följande ha uppnåtts:

- Säkerhetsredovisningen är förnyad, på det sätt som krävs inför provdrift.
- Slutförvarsanläggningen är uppförd och driftsatt. I detta inkluderas även att anläggningsdokumentationen är komplett samt att driftorganisation och administrativa rutiner är på plats och intrimmade.

Teknikutveckling

Teknikutvecklingen har nu nått så långt att en referensutförning för Kärnbränsleförvaret är fastställd. Fortsatt teknikutveckling behövs när vi nu går från principlösningar till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process med fastställda krav på kvalitet, kostnad och tidsåtgång.

Det återstående utvecklingsarbetet kräver omfattande tekniska resurser. SKB:s egna laboratorier – Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet – är byggda och utrustade för tester, demonstrationer och generalrepetitioner i full skala. Även andra anläggningar såsom Posivas anläggning Onkalo i Finland och andra underjordsanläggningar och laboratorier i Europa kommer att vara värdefulla för vårt utvecklingsarbete.

SKB tillämpar systematisk kravhantering för att styra teknikutvecklingen. Det innebär att beslut om att ändra lösningar i förhållande till gällande referensutförning eller referensverksamhet sker på ett systematiskt och styrt sätt. Utvecklingen inom de olika produktionslinjerna för bränsle, kapsel, buffert, återfyllnad, förslutning och berg sker i enlighet med en leveransstyrmodell för teknikutvecklingen. Resultat från teknikutvecklingen inom produktionslinjerna utgör underlag för säkerhetsredovisningen för slutförvar och inkapslingsanläggning. Nuläget samt behov av teknikutveckling inom de olika produktionslinjerna redovisas nedan.

Bränslelinjen

Alla i dag kända bränsletyper i det svenska kärnkraftsprogrammet har analyserats för att säkerställa att kapseln i alla lägen är underkritisk. SKB kommer att utreda hur bränsle som inte uppfyller kriticitetsvillkoren ska hanteras. Detta berör endast eventuellt framtida PWR-bränsle med höga anrikningar och låga utbränningar.

SKB har sedan mitten av 1990-talet följt utvecklingen av beräkningsprogram för resteffekt samt utvecklat metoder för att utföra kompletterande mätningar. För noggranna mätningar av resteffekt har kalorimetriska mätningar på bränsleelement genomförts. Utveckling pågår för att få fram en snabbare metod för att genomföra resteffekt-mätningar.

Andra områden som kommer att studeras är hur långa lagringstider påverkar bränslet samt metoder för torkning av bränsle.

Kapsellinjen

SKB har valt referensmetoder för tillverkning av kapselns komponenter samt för svetsning och förslutning. Vi har fortsatt arbetet med att precisera konstruktionsförutsättningar för kapseln. Detaljerade specifikationer och belastningar som kapseln ska uppfylla i Kärnbränsleförvaret finns framtagna.

De fortsatta insatserna kommer att fokusera på att slutföra detaljkonstruktion för kapseln och på inkapslingsprocessen med nuklearisering av svetsning och oförstörande provning. Vidare kommer vi att arbeta vidare med utveckling av maskiner för hantering av kapslarna i förvaret.

Buffertlinjen

SKB har gjort omfattande tester av tekniken för tillverkning och installation av buffert. Storskaliga försök med det så kallade buffertsyddet, som ska förhindra alltför snabb mättnad av bufferten, har genomförts vid Äspölaboratoriet. Arbetet med att utveckla metod för att pressa buffertblock har fortsatt och ett femtontal fullskaliga buffertblock har pressats.

Studier av hur bufferten påverkas av inflödande vatten har genomförts i Bentonitlaboratoriet. Fenomen som vi studerat är erosion av bentoniten, hävning av buffertblock, samt uppbyggnad av vattentryck i bufferten.

De fortsatta insatserna kommer att fokusera på erosion av buffert samt på att slutföra konstruktion av bufferten inom den valda referensutförningen. Det så kallade Prototypförvaret som installerades 2001 kommer att brytas under 2011 och vi får då möjlighet att studera hur det integrerade systemet med kapsel, buffert och återfyllning har utvecklats. En kvantitativ modell för att beskriva utvecklingen av densitet och svälltryck för det samverkande systemet buffert, återfyllning och plugg för tiden mellan installation och förvarets förslutning kommer att utvecklas.

Återfyllnadslinjen

Utvecklingen av ett återfyllningskoncept med naturligt svällande lera har pågått under lång tid. Teknik och metoder för att bereda lera inför pressningen till block är känd och beprövad, likaså metoden att tillverka block med enaxlig pressning.

Konceptet för att installera buffertblock kommer att vidareutvecklas och hantering och installation kommer att utvecklas och testas både i Bentonitlaboratoriet och under mer realistiska förhållanden vid Äspölaboratoriet. Vi kommer också att arbeta med att slutföra konstruktion av den plugg som kommer att användas i deponeringstunnlarna.

Förslutningslinjen

SKB planerar att under de kommande tre åren studera alternativa koncept för utformning av förslutningen.

Berglinjen

Berglinjen omfattar detaljundersökningar, projektering, byggande och underhåll av Kärnbränsleförvarets undermarksutrymmen. Utvecklingsarbetet spänner över ett brett fält och avser metoder för undersökningar, karakterisering och bergbyggande, inklusive tättnings- och förstärkningsåtgärder, samt utveckling av specialutrustningar. Valet av Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret har stor betydelse för berglinjens program för teknikutveckling.

SKB har genomfört omfattande undersökningar av uppkomsten av en eventuell sprängskadegon. Erfarenheterna från dessa undersökningar är mycket positiva med avseende på de krav som återfyllningen ställer på tunnelkonturen, samt krav för att uppfylla den långsiktiga säkerheten. För att uppfylla dessa krav i löpande produktion krävs ytterligare utveckling. Vi kommer också att fortsätta arbetet med vidareutveckling av metoder för verifiering av sprängskadorna.

Metoder för undersökningar, tolkning av resultat och modellering har utvecklats under lång tid. SKB har en bred kunskapsbas inför kommande detaljundersökningar. Ett program för dessa undersökningar kommer att redovisas i samband med ansökan.

Ett omfattande fullskaleförsök har genomförts för att demonstrera tekniken för tätning av berget med hjälp av injektering. Projektet har gett oss värdefulla kunskaper om hur injekteringsmaterialens egenskaper påverkar injekteringsprocessen och dess resultat. Vi har nu ett bra underlag för att pröva olika modeller för inflöden och tätning i syfte att förstå och kunna prognostisera dessa processer. Förståelsen ska sedan omsättas dels i metoder för undersökning och konstruktion, och dels i utveckling av utrustning och material.

KBS-3H

SKB och Posiva utreder om horisontell deponering kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering. Målet är att utveckla tekniken för KBS-3H så långt att det i en senare etapp är möjligt att demonstrera tekniken i full skala samt ha tillräckligt med underlag för att jämföra med vertikal deponering. Programmet för de närmaste åren omfattar följande huvudaktiviteter:

- Utformning av ett KBS-3H-förvar.
- Demonstration i Äspölaboratoriet.
- Studier av nyckelfrågor med hänsyn till långsiktig säkerhet.

Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet

I Fud-program 2010 beskrivs den forskning som stöder analyserna av den långsiktiga säkerheten för Kärnbränsleförvaret samt det utbyggda SFR. Mycket av den forskning som relaterar till Kärnbränsleförvaret och SFR är också relevant för den forskning som kommer att bli aktuell för säkerhetsanalysen för SFL.

Den forskning som bedrivs med syfte att öka kunskapen om den långsiktiga säkerheten för slutförvaret för använt kärnbränsle har främst haft som syfte att ge underlag till säkerhetsanalysen för ett förvar i Forsmark, SR-Site. Forskningen har fokus på processer i de tekniska och naturliga barriärer som ingår i förvarskonceptet.

Vissa forskningsområden är övergripande och hanteras gemensamt för samtliga förvarssystem. Dessa områden är generella metoder för säkerhetsanalys, klimatutveckling, geosfär samt yt nära ekosystem. Framtida klimatförändringar kan innebära glaciation och permafrost. Dessa två företeelser har stor inverkan på miljön runt ett slutförvar. Därför kan klimatet indirekt påverka barriärerna i ett förvar och därmed utfallet av en säkerhetsanalys.

En mängd processer i berget påverkar utfallet av en säkerhetsanalys. Dessa är bland annat sprickbildning, grundvattenströmningar, vattenkemi och jordskalv. Radionuklidtransport och retention i berget ingår i modelleringen av dessa processer.

Platsdata och framtagna modeller av ekosystemet i Forsmark ligger till grund för forskningen inom yt nära ekosystem. I forskningen ingår arbete med numeriska modeller för dosberäkningar.

Metodikutveckling för analys av långsiktig säkerhet för SFR baseras på den metodik som har tagits fram för Kärnbränsleförvaret.

Forskning kopplad till respektive förvarssystem

Den forskning som specifikt relaterar till den långsiktiga säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret sker inom områdena Bränsle, Kapsel, Buffert och återfyllning.

Forskning för SFR och säkerhetsanalysen för det utbyggda förvaret sker inom områdena Kortlivat låg- och medelaktivt avfall samt Tekniska barriärer för SFR.

Kärnbränsleförvaret

Vår kunskapsnivå vad gäller den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar i Forsmark, bedöms nu vara så hög att det är möjligt att gränssätta betydelsen av identifierade osäkerheter. Forskningsprogrammet fortsätter dock för att vi ska få ytterligare kunskap och kunna kvantifiera kvarvarande osäkerheter.

Det använda bränslets egenskaper samt de processer som sker om bränslet kommer i kontakt med vatten utgör en väsentlig del av underlaget för säkerhetsanalysen. Vissa av dessa processer är starkt bundna till initialtillståndet (typ av bränsle, utbränningsgrad med mera).

Kapselns förmåga att isolera bränslet är väsentlig och forskningen är fokuserad kring de processer som kan förväntas ske efter deponering. Viktiga processer är korrosion och mekaniska belastningar.

Alla processer i bufferten efter deponering, till exempel vattenupptag och svällning, eller frysning och erosion, är viktiga för utfallet av säkerhetsanalysen. Många processer i återfyllningen är i det närmaste identiska med de som sker i bufferten.

SFR

Arbete med säkerhetsanalysen för det utbyggda SFR pågår. De processer som behandlas är specifika för just denna typ av avfall och forskningen är fokuserad på korrosion och degradering av organiska ämnen i avfallet.

De befintliga tekniska barriärerna i SFR samt de som planeras i utbyggnaden, påverkas till stor del av processer som sker i cement och betong vilket avspeglas i forskningsprogrammet. Forskning kring de processer som sker i de lerbarriärer som används i SFR (silobufferten) presenteras gemensamt med forskning kring buffert och återfyllning.

Andra metoder

SKB fortsätter att följa utvecklingen omkring separation och transmutation samt deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål.

Del V Samhällsvetenskaplig forskning

Sedan år 2004 bedriver och finansierar SKB forskning inom det samhällsvetenskapliga området. Forskningsresultaten har bidragit till en djupare förståelse av historiska, ekonomiska och opinionsmässiga aspekter. Samhällsforskningen har därmed bidragit till att öka den allmänna kunskapsbasen och har även kommit till användning i vårt praktiska arbete.

När SKB har lämnat in ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken kommer de att hanteras inom ramen för det demokratiska systemet, lokalt och nationellt. SKB vill därför, för bland annat beslutsfattare och allmänhet, kunna presentera ett från ansökningarna fristående underlag som kan ge en bred belysning av viktiga samhällsaspekter.

Våren 2008 och 2009 gjordes den femte och sjätte utlysningen av forskningsmedel, med ledning av de synpunkter på programmet som inkommit från kommuner, myndigheter och övriga remissinstanser. Nedanstående projekt beviljades medel vid dessa utlysningar:

- Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet, Uppsala universitet.
- Demokratiska kärnfrågor – En studie av hur opinioner och omvärldsförändringar påverkar politiska beslutsprocesser kring slutförvaringen av kärnavfall, Mittuniversitetet.
- Kärnavfallens tidsperspektiv i jämförelse, Kungliga Tekniska högskolan.

Nya och kompletterande frågeställningar kan komma att aktualiseras under prövningen av SKB:s tillståndsansökningar. Det är vår ambition att forskningsprogrammet för perioden 2004–2011 ska tillgodose de behov som finns av att få olika samhällsaspekter belysta.

Innehåll

Del I Övergripande handlingsplan

1	Hanteringen av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle	23
1.1	Förutsättningar	23
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	23
1.1.2	Grundläggande principer	24
1.1.3	Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet	25
1.2	Beskrivning av avfallssystemet	27
1.2.1	Det svenska systemet	27
1.2.2	Anläggningar inom systemet för mycket lågaktivt och låg- och medelaktivt avfall	27
1.2.3	Anläggningar inom KBS-3-systemet	31
1.2.4	Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	35
1.3	Program för forskning, utveckling och demonstration	38
1.4	Kompetens och organisation	42
1.5	Kravhantering	43
2	Övergripande handlingsplan	45
2.1	Huvudtidsplan	45
2.2	Loma-programmet	46
2.2.1	Nuläge	46
2.2.2	Planering	46
2.3	Kärnbränsleprogrammet	47
2.3.1	Nuläge	47
2.3.2	Planering	47
2.3.3	Förslutning och möjlighet till återtag	48
3	Flexibilitet vid ändrade förutsättningar	49
3.1	Kärnkraftsreaktorernas drifttider	49
3.2	Nya kärnkraftsreaktorer	50
3.3	Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink	51
3.4	Drifttagning av det utbyggda SFR	52

Del II Loma-programmet

4	Handlingsplan för genomförande	55
4.1	Loma-programmet	56
4.2	Planering	56
4.2.1	Planering för kortlivat drift- och rivningsavfall	56
4.2.2	Planering för långlivat drift- och rivningsavfall	58
4.3	Milstolpar	59
4.3.1	Milstolpar för kortlivat drift- och rivningsavfall	59
4.3.2	Milstolpar för långlivat drift- och rivningsavfall	60
4.3.3	Andra viktiga milstolpar	61
5	Hantering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	63
5.1	Avfallshantering hos avfallsleverantörer	63
5.1.1	Uppkomst och karakterisering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	63
5.1.2	Konditionering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	64
5.2	SFR – slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall	65
5.2.1	Drift av anläggningen	65
5.2.2	Underhåll	67
5.2.3	Informationshantering avseende avfall vid mellanlagring och deponering	67
5.3	Utbyggnad av slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	68
5.3.1	Huvudskeden och tidsplan	69

5.3.2	Överordnade krav på anläggningen	70
5.3.3	Lokalisering	72
5.3.4	Återkoppling från platsundersökningar	72
5.3.5	Arbetsmetodik för projektering	74
5.3.6	Säkerhetsredovisning	76
5.4	Teknikutveckling för slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	76
5.4.1	Barriärer	76
5.4.2	Förslutning	77
5.5	Markförvar	77
6	Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall	79
6.1	Långlivat radioaktivt avfall	79
6.2	Mellanlager för långlivat avfall	81
6.3	Slutförvar för långlivat avfall	83
6.3.1	Övergripande planering och redovisningar	83
6.3.2	Uppdatering av referensinventariet	84
6.3.3	Förvarskoncept	85
6.3.4	Naturvetenskaplig forskning	86
7	Ansvar, planering och teknik för avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar	89
7.1	Ansvarsfördelning	89
7.1.1	Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare till svenska kärnkraftsreaktorer	91
7.1.2	Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare/ägare till Ågesta kraftvärmereaktor	91
7.2	Planering inför avveckling och rivning	93
7.2.1	Avvecklingsstrategier	93
7.2.2	Tillståndshavarnas planering för avveckling och rivning	93
7.2.3	SKB:s planering för avveckling och rivning	98
7.3	Utveckling av metoder och teknik för avveckling	99
7.3.1	Internationellt arbete och samarbete	99
7.3.2	Kärnkraftsföretagens utvecklingsarbete	99
7.3.3	Friklassning	99
Del III Kärnbränsleprogrammet		
8	Nuläge och utgångspunkter	103
8.1	Introduktion	103
8.2	Huvudskeden och tidsplan	103
8.3	Inkapsling	105
8.3.1	Tillståndsprovning	106
8.3.2	Uppförande	106
8.3.3	Driftsättning	107
8.4	Slutförvarsanläggning	107
8.4.1	Tillståndsprovning	109
8.4.2	Uppförande	109
8.4.3	Driftsättning	111
8.4.4	Arbetsmetodik under uppförande och driftsättning	113
9	Översikt – teknikutveckling	115
9.1	Utgångspunkter	115
9.1.1	Konstruktionsförutsättningar	115
9.1.2	Platsanpassade lösningar	116
9.2	Styrning och redovisning	116
9.2.1	Leveransstyrmodell	116
9.2.2	Rapportering	117
9.3	Behov av teknikutveckling	117
9.3.1	Övergripande behov	118
9.3.2	Bränslelinjen	119

9.3.3	Kapsellinjen	119
9.3.4	Buffertlinjen	120
9.3.5	Återfyllnadslinjen	121
9.3.6	Förslutningslinjen	121
9.3.7	Berglinjen	121
9.3.8	Produktionssystem och logistik	123
9.3.9	KBS-3H	124
9.3.10	Sammanfattning	124
10	Teknikutveckling bränslehantering	127
10.1	Krav och förutsättningar	127
10.2	Nuläge och program	129
10.3	Resteffekt och strålning	129
10.4	Vatten och vattenånga	130
10.5	Kriticitet	130
10.6	Kärnämneskontroll	130
11	Teknikutveckling kapsel	133
11.1	Krav och förutsättningar	133
11.1.1	Barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret	134
11.1.2	Det använda kärnbränslet	134
11.1.3	Produktion av kapslar och inkapsling	134
11.1.4	Driften av KBS-3-systemet	135
11.2	Nuläge och program	135
11.3	Kapselutformning – analyser av kapseln	138
11.4	Tillverkning och provning av insatser	139
11.4.1	Tillverkning	139
11.4.2	Provning av insatser	141
11.5	Tillverkning och provning av kopparkomponenter	142
11.5.1	Tillverkning av kopparkomponenter	142
11.5.2	Provning av kopparkomponenter	143
11.6	Förslutning och provning av svetsen	143
11.6.1	Förslutning	143
11.6.2	Provning av svetsar	146
11.7	Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret	147
11.7.1	Transport i rampen	147
11.7.2	Deponering	148
12	Teknikutveckling buffert	149
12.1	Krav och förutsättningar	149
12.2	Nuläge och program	149
12.2.1	Systemkonstruktion av buffert	151
12.2.2	Alternativ referensutformning	153
12.3	Kompakteringsteknik	154
12.4	Prototypförvaret	154
13	Teknikutveckling återfyllning	157
13.1	Krav och förutsättningar – återfyllning	157
13.2	Nuläge och program – återfyllning	157
13.2.1	Val och specifikation av material	159
13.2.2	Installerad densitet och tunnelns geometriska konfiguration	159
13.2.3	Tillverkning och hantering av komponenter och material	159
13.2.4	Installation av återfyllning i deponeringstunnlar	161
13.2.5	Kontroll av material, komponenter och installerad återfyllning	162
13.3	Krav och förutsättningar – pluggar	162
13.4	Nuläge och program – pluggar	162
14	Teknikutveckling förslutning	165
14.1	Krav och förutsättningar	165
14.2	Nuläge och program	166

14.2.1	Referensutformning	166
14.2.2	Program	168
15	Teknikutveckling berg	171
15.1	Krav och förutsättningar	171
15.2	Nuläge och program	172
15.2.1	Programöversikt	172
15.3	Metodik för bergprojektering	174
15.4	Verktyg för detaljundersökningar	174
15.5	Utförandemetoder, byggnadsmaterial och specialmaskiner	179
15.5.1	Injektering	179
15.5.2	Berguttag	180
15.5.3	Material med lågt pH	183
15.5.4	Deponeringshål	184
15.6	Verktyg för datahantering och visualisering	186
15.6.1	Databaser	186
15.6.2	Visualiseringssystem	186
16	KBS-3H – horisontell deponering	187
16.1	Nuläge och program	188
16.1.1	Utformning av ett KBS-3H-förvar	189
16.1.2	Demonstration i Äspölaboratoriet	190
16.1.3	Långsiktig säkerhet	191
Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet		
17	Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet	195
17.1	Övergripande forskningsområden	195
17.2	Forskning kopplad till förvarssystem	195
17.3	Forskning i Äspölaboratoriet och Nova FoU	198
17.3.1	Forskning i Äspölaboratoriet	198
17.3.2	Forskningsbreddning vid Nova FoU	199
17.4	Andra metoder	199
18	Säkerhetsanalys	201
18.1	Inledning	201
18.2	Metodik för analys av Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet	201
18.2.1	Metodik i SR-Can och granskning av denna	201
18.3	Analys av SFR:s långsiktiga säkerhet	202
19	Klimatutveckling	207
19.1	Klimatutvecklingar i SKB:s säkerhetsanalyser	207
19.2	Inlandsdynamik och glacial hydrologi	209
19.3	Isostatiska förändringar och strandlinjeförskjutning	213
19.4	Permafrost	215
19.5	Klimat och klimatvariationer	217
19.6	Greenland Analogue Project (GAP)	219
20	Kortlivat låg- och medelaktivt avfall	223
20.1	Initialtillstånd i avfallet	223
20.1.1	Variabler	223
20.1.2	Geometri	224
20.1.3	Strålningsintensitet	224
20.1.4	Temperatur	224
20.1.5	Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor	225
20.1.6	Mekaniska spänningar	225
20.1.7	Totalt radionuklidinventarium	225
20.1.8	Kemotoxiskt inventarium	227
20.1.9	Materialsammansättning	227
20.1.10	Vattensammansättning och vattenmättnad	228
20.1.11	Gassammansättning	228

20.2	Processer	229
20.2.1	Översikt av processer	229
20.2.2	Frysning	230
20.2.3	Vattenupptag i jonbytare och avfallsmatris	230
20.2.4	Vattentransport	231
20.2.5	Tvåfasflöde/gastransport	231
20.2.6	Expansion/kontraktion av avfallet	231
20.2.7	Sprickbildning	232
20.2.8	Bergutfall	232
20.2.9	Upplösning/utfällning	232
20.2.10	Degradering av organiska ämnen	233
20.2.11	Speciering	234
20.2.12	Korrosion	235
20.2.13	Diffusion	236
20.2.14	Advektion och blandning	236
20.2.15	Kolloidbildning/kolloidtransport	237
20.2.16	Mikrobiell aktivitet	237
20.2.17	Radiolytisk degradering	238
20.3	Modellering – radionuklidtransport	238
21	Tekniska barriärer i SFR	239
21.1	Initialtillståndet hos tekniska barriärer	239
21.1.1	Variabler	240
21.1.2	Geometri	240
21.1.3	Porgeometri	241
21.1.4	Temperatur	241
21.1.5	Vattenmättnad	241
21.1.6	Mekaniska spänningar	242
21.1.7	Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor	242
21.1.8	Porvattensammansättning	243
21.1.9	Betongsammansättning	243
21.2	Processer	244
21.2.1	Översikt av processer	244
21.2.2	Värmetransport	245
21.2.3	Frysning	245
21.2.4	Vattentransport	247
21.2.5	Tvåfasflöde/gastransport	247
21.2.6	Expansion/kontraktion	248
21.2.7	Sprickbildning	248
21.2.8	Bergutfall	249
21.2.9	Upplösning/utfällning	250
21.2.10	Kemisk cement- och betongdegradering	250
21.2.11	Korrosion	251
21.2.12	Sorption	251
21.2.13	Diffusion	253
21.2.14	Advektion och blandning	253
21.2.15	Kolloidbildning/kolloidtransport	253
21.2.16	Mikrobiell aktivitet	254
21.3	Modellering av radionuklidtransport för SFR	254
21.3.1	Processer som påverkar radionuklidtransport	254
21.3.2	Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007	254
21.3.3	Program för beräkningskoder för radionuklidtransport	254
22	Bränsle	255
22.1	Initialtillstånd	255
22.1.1	Variabler	255
22.1.2	Totalt radionuklidinventarium	255
22.1.3	Gapinventarium	256
22.1.4	Materialsammansättning	257

22.1.5	Gassammansättning	257
22.2	Processer i bränsle/hålrum	257
22.2.1	Översikt av processer	257
22.2.2	Radioaktivt sönderfall	258
22.2.3	Stråldämpning/värmealstring	259
22.2.4	Inducerad fission – kriticitet	259
22.2.5	Vattenradiolys	260
22.2.6	Bränsleupplösning	260
22.2.7	Speciering av radionuklider, kolloidbildning	264
22.2.8	Heliumproduktion	265
23	Kapsel	267
23.1	Initialtillstånd	267
23.1.1	Variabler	267
23.2	Kapselprocesser	268
23.2.1	Översikt av processer	268
23.2.2	Deformation gjutjärnsinsats	268
23.2.3	Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck	269
23.2.4	Deformation från inre korrosionsprodukter	270
23.2.5	Strålpåverkan	271
23.2.6	Korrosion gjutjärnsinsats	271
23.2.7	Korrosion kopparkapsel	272
23.2.8	Spänningskorrosion kopparkapsel	275
23.2.9	Utfällning av salt på kapselytan	276
23.2.10	Radionuklidtransport	276
24	Buffert och återfyllning	277
24.1	Initialtillstånd	277
24.1.1	Variabler	278
24.1.2	Geometri	278
24.1.3	Porgeometri	279
24.1.4	Strålintensitet	280
24.1.5	Temperatur	280
24.1.6	Vattenhalt	280
24.1.7	Gashalter	280
24.1.8	Hydrovariabler	280
24.1.9	Lastsituation	281
24.1.10	Bentonitsammansättning	281
24.1.11	Montmorillonitsammansättning	282
24.1.12	Porvattensammansättning	282
24.1.13	Konstruktionsmaterial	283
24.2	Processer i buffert och återfyllning	283
24.2.1	Översikt av processer	283
24.2.2	Stråldämpning/värmealstring	283
24.2.3	Värmetransport	283
24.2.4	Frysning	285
24.2.5	Vattentransport vid omättade förhållanden	287
24.2.6	Vattentransport vid mättade förhållanden	290
24.2.7	Gastransport/gaslösning	292
24.2.8	Piping/erosion	294
24.2.9	Mekaniska processer	296
24.2.10	Termisk expansion	302
24.2.11	Integrerade studier – THM-utveckling under vattenmättnadsfasen	302
24.2.12	Advektion	306
24.2.13	Diffusion	306
24.2.14	Osmos	307
24.2.15	Jonbyte/sorption	308
24.2.16	Montmorillonitomvandling	309
24.2.17	Järn-bentonit interaktioner	313

24.2.18	Lösning/fällning föroreningar	314
24.2.19	Cementering	315
24.2.20	Kolloidfrigörelse/erosion	316
24.2.21	Strålinducerad montmorillonitomvandling	322
24.2.22	Radiolys av porvatten	322
24.2.23	Mikrobiella processer	322
24.2.24	Radionuklidtransport – advektion	322
24.2.25	Radionuklidtransport – diffusion	322
24.2.26	Radionuklidtransport – sorption	323
24.2.27	Speciering av radionuklider	324
24.2.28	Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit	324
24.3	Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet	325
25	Geosfären	327
25.1	Initialtillstånd för geosfären	327
25.2	Processer i geosfären	327
25.2.1	Översikt av processer	327
25.2.2	Värmetransport	328
25.2.3	Grundvattenströmning	329
25.2.4	Gasströmning/gaslösning	332
25.2.5	Rörelser i intakt berg	333
25.2.6	Termisk rörelse	333
25.2.7	Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor	334
25.2.8	Sprickbildning	338
25.2.9	Tidsberoende deformationer	339
25.2.10	Advektion/blandning – grundvattenkemi	339
25.2.11	Advektion/blandning – radionuklidtransport	340
25.2.12	Diffusion – grundvattenkemi	341
25.2.13	Diffusion – radionuklidtransport	342
25.2.14	Reaktioner med berget – grundvattenkemi	343
25.2.15	Reaktioner med berget – sorption av radionuklider	345
25.2.16	Mikrobiella processer	347
25.2.17	Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial	348
25.2.18	Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten	348
25.2.19	Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider	350
25.2.20	Gasbildning/gaslösning	351
25.2.21	Metanisomsättning	351
25.2.22	Saltutfrysning	352
25.3	Modellering	353
25.3.1	DFN	353
25.3.2	Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling	355
25.3.3	Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling	357
25.3.4	Integrerad modellering – radionuklidtransport	358
26	Ytnära ekosystem	361
26.1	Översikt av programmet	361
26.2	Utgångspunkter för beskrivning och modellering av ytnära ekosystem	362
26.3	Terrestra ekosystem	364
26.4	Akvatiska ekosystem	366
26.5	Biogeokemi	369
26.6	Hydrologi och transport	372
26.7	Effekter av långtidsvariationer	375
26.8	Landskapsutveckling och avlagringar	377
26.9	Radionuklidmodellering	379
26.10	Nationella samarbeten, internationellt arbete samt informationsspridning	382
26.10.1	Aktiviteter	383
27	Andra metoder	385
27.1	Separation och transmutation	386
27.2	Djupa borrhål	389

Del V Samhällsvetenskaplig forskning	
28 Översikt – samhällsvetenskaplig forskning	397
29 Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter	403
30 Beslutsprocesser	405
31 Opinion och attityder – psykosociala effekter	409
32 Omvärldsförändringar	417
Referenser	423
Bilaga Förkortningar	453

Del I

Övergripande handlingsplan

- 1 Hanteringen av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle
- 2 Övergripande handlingsplan
- 3 Flexibilitet vid ändrade förutsättningar

1 Hanteringen av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle

Den svenska kraftindustrin har under cirka 40 år producerat elektricitet med 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 kortlivat radioaktivt avfall (SFR) samt fartyget m/s Sigyn och behållare för transporterna.

För omhändertagandet av det använda kärnbränslet återstår att bygga och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. I detta ingår att bygga ut Clab med en anläggning för inkapsling av det använda kärnbränslet, behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och en slutförvaringsanläggning där kapslarna ska deponeras. För det låg- och medelaktiva avfallet kommer det att behövas en utbyggnad av SFR, ett förvar för långlivat radioaktivt avfall (SFL) och behållare för transporter av långlivat avfall. SKB:s handlingsplan beskriver de övergripande planerna för att realisera de återstående delarna av avfallssystemet på ett sådant sätt att människa och miljö skyddas – i dag och i framtiden.

Vidare måste befintliga system och anläggningar (Clab, SFR och transportsystemet) löpande underhållas och moderniseras bland annat med tanke på förlängda planerade drifttider för de svenska reaktorerna och därmed för kärnavfallssystemet.

1.1 Förutsättningar

1.1.1 Gällande regelverk och SKB:s uppdrag

I Sverige har den som har tillstånd att ha kärnteknisk verksamhet ansvaret för att hantera och slutförvara det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet på ett säkert sätt. Skyldigheterna avseende hantering och slutförvaring av radioaktivt avfall regleras i lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet, i strålskyddslagen (1988:220), i lagen (2006:647) om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet och i tillhörande förordningar samt i vissa tillstånd och riktlinjer som regeringen utfärdat.

Bestämmelserna innebär att kärnkraftsföretagen, det vill säga tillståndshavarna för kärnkraftverken, ska svara för alla de åtgärder som behövs för att ta hand om det radioaktiva avfallet på ett säkert sätt. Däri ingår både att på ett säkert sätt hantera och slutförvara i verksamheten uppkommet kärnavfall och använt kärnbränsle, och att på ett säkert sätt avveckla och riva anläggningarna när de tjänat ut. Vidare ska de bedriva den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att fullgöra dessa skyldigheter.

Kärnkraftsföretagen har givit Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, uppdraget att svara för kärnavfallshanteringen från det att avfallet lämnar kärnkraftverken. Det är därför SKB som äger och driver anläggningarna för dagens avfallshantering, se avsnitt 1.2. Det är också SKB som direkt eller indirekt bedriver forsknings- och utvecklingsarbetet för det slutliga omhändertagandet av avfallet. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) övervakar SKB:s verksamhet.

Den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnkraftsreaktor ska i samråd med övriga reaktorinnehavare utarbeta ett program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och övriga åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet på ett säkert sätt samt för att avveckla och riva kärnkraftverken. Ett sådant program (Fud-program) ska vart tredje år lämnas till SSM. Programmen granskas och utvärderas av myndigheten efter en omfattande remissbehandling och det granskas av Kärnavfallsrådet som lämnar sina synpunkter till regeringen. Regeringen fattar sedan beslut om programmet ska godkännas. Det är SKB som på uppdrag av kärnkraftsföretagen utarbetar Fud-programmen. De Fud-program som SKB hittills har presenterat beskrivs kort i avsnitt 1.3.

Kärnkraftsföretagen är skyldiga att svara för kostnaderna för de åtgärder som behövs för att omhänderta kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla anläggningarna. Kostnaderna för omhändertagandet av driftavfall betalas löpande, medan finansieringen av kärnavfallsprogrammet i övrigt bygger på att medel samlas i en särskild fond, Kärnavfallsfonden, enligt regler i finansieringslagen och finansieringsförordningen. På uppdrag av kärnkraftsföretagen upprättar SKB numera en kostnadsberäkning vart tredje år. SSM granskar SKB:s beräkning och lämnar förslag på avgifter och säkerheter. Avgifterna och säkerheternas storlek beslutas av regeringen (med undantag av den säkerhet som ställs för Barsebäck, som beslutas av SSM). Kärnkraftsföretagen betalar in medlen till Kärnavfallsfonden och dessa medel får, enligt regeringens föreskrifter, placeras på räntebärande konto i Riksgäldskontoret eller i skuldförbindelser utfärdade av staten. Under år 2009 infördes utökade placeringsmöjligheter för fonden. Ändringen innebär att fondens tillgångar även kan placeras i vissa skuldförbindelser som inte är utgivna av staten. De värdepapper som därvid avses är säkerställda bostadsobligationer.

Vid årsskiftet 2009/2010 fanns cirka 42 miljarder kronor i kärnkraftsföretagens andelar av Kärnavfallsfonden (marknadsvärdet). Därutöver har cirka 30 miljarder kronor (i dagens prisnivå) använts för uppbyggnad och drift av dagens system och för forsknings- och utvecklingsarbetet. Under åren 2010 och 2011 är den genomsnittliga avgiften cirka ett öre per producerad kilowattimme el för de kärnkraftverk som är i drift. Avgiften för Barsebäck Kraft AB är 247 miljoner kronor för vardera av dessa år.

Förutom att betala avgifter, ställer kärnkraftsföretagens moderbolag säkerheter för att täcka de avgifter som ännu inte är betalda. För de reaktorer som är i drift ställs även en säkerhet för det fall att fonden inte skulle komma att räcka på grund av oplanerade händelser. Regeringen har dessutom möjlighet att ålägga ett kärnkraftsföretag att utöver kärnavfallsavgiften också betala en riskavgift samt att kräva att kärnkraftsföretaget ska ange ett eller flera ägarbolag som åtar sig att fullgöra företagets avgiftsskyldighet.

Förutom omhändertagande av det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken svarar SKB också för hanteringen av visst övrigt radioaktivt avfall. Det rör sig om låg- och medelaktivt avfall från sjukvård, industri och forskning vilket behandlas och förpackas i Studsvik, avfall från hantering i Studsvik, samt avfall från rivning av anläggningar i Studsvik. Avfall från Westinghouse anläggningar i Västerås och från uranbrytningen i Ranstad planeras att hanteras av Studsvik Nuclear AB eller AB SVAFO¹ och ingår därför i det avfall som kommer därifrån. Avtal finns mellan Studsvik och SKB rörande det avfall som hanteras av Studsvik.

AB SVAFO hanterar äldre avfall och bränsle från Studsvikområdet, samt rivning av Ågestareaktorn och återställning av Ranstads gruvhantering. Enligt ett avtal med SVAFO har SKB förbundit sig att bereda utrymme för slutförvaring av radioaktivt drift- och rivningsavfall samt kärnbränsle från SVAFO.

1.1.2 Grundläggande principer

Hanteringen 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 kärnbränslet ska inte upparbetas.

SKB planerar för en geologisk slutförvaring av det långlivade kärnavfallet och det använda kärnbränslet. Geologisk slutförvaring diskuterades 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. Flertalet länder är i dag överens

¹ AB SVAFO som ägs av Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag samt Barsebäck Kraft AB ingår i Vattenfallkoncernen.

om att geologisk deponering är en lösning som uppfyller alla krav på säker slutförvaring och genomförbarhet.

Följande principer ligger till grund för utformningen av SKB:s slutförvar för det använda kärnbränslet respektive det långlivade radioaktiva avfallet:

- Förvaren ska förläggas till en långsiktig stabil geologisk miljö.
- Förvaren ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för framtida generationer.
- Förvarens säkerhet ska baseras på flera barriärer.
- Tekniska barriärer ska i första hand bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Barriärerna ska fungera passivt, det vill säga utan ingripande av människan och utan tillförsel av energi eller material.
- Förvaren ska utformas på ett sådant sätt att de inte behöver övervakas efter förslutning.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, som är i drift bygger också på dessa principer.

Flerbarriärprincipen är en grundläggande och internationellt vedertagen säkerhetsprincip för slutförvaring. Den innebär att ett slutförvars säkerhet efter förslutning ska baseras på flera barriärer som har till uppgift att innesluta, förhindra eller fördröja spridningen av de radioaktiva ämnena i avfallet. Vilka barriärer eller barriärfunktioner som behövs i ett slutförvar beror till stor del på innehållet av radioaktiva ämnen och deras halveringstider.

Ovanstående principer tillsammans med en rad andra överväganden, som till exempel att förvaret rent tekniskt ska vara möjligt att konstruera, har lett till att SKB valt KBS-3-systemet för slutförvaring av använt kärnbränsle. I den jämförande systemanalys /1-1/ som SKB genomförde under år 2000 bedömdes KBS-3-metoden vara den mest fördelaktiga metoden. I analysen jämförde SKB olika metoder för att ta hand om använt kärnbränsle. Utvärderingen gjordes mot uppställda krav, såväl övergripande och samhälleliga krav som miljö-, säkerhets- och strålskydds krav.

Valet av lämpliga platser för förvaren bör ske i steg med fokus på säkerhets- och miljöaspekterna och genom en öppen demokratisk process i samverkan med myndigheter och de berörda kommunerna. Denna princip har varit SKB:s ledstjärna under den platsvalsprocess som ledde fram till att SKB år 2009 valde Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret. I slutet stod valet mellan Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Avgörande för valet var att förutsättningarna för att åstadkomma ett långsiktigt säkert förvar bedömdes vara bättre i Forsmark.

1.1.3 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet

Planeringen för omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet styrs av olika förutsättningar. Avfallens egenskaper är en av de viktigaste. Avfallet delas in i kategorier efter graden av radioaktivitet (mycket låg-, låg-, medel- samt högaktivt) samt efter aktivitetens livslängd (kort- eller långlivat avfall). Graden av radioaktivitet styr hur avfallet hanteras. Det medelaktiva avfallet och det använda kärnbränslet, som är högaktivt, kräver en strålskärmad hantering medan det mycket lågaktiva och det lågaktiva avfallet kan hanteras utan strålskärmning. Hur slutförvaringen ska utformas styrs till stor del av om avfallet är kortlivat eller långlivat.

Hur stor mängd avfall som uppkommer och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Avfallsmängderna är beroende av hur lång drifttid reaktorerna antas ha. De antagna drifttiderna påverkar direkt kapaciteten och drifttiden för de olika anläggningarna. Den långsiktiga planeringen för avfallssystemet baseras på de planeringsförutsättningar som gäller för befintliga reaktorer i drift. Detta innebär 50 års drift av reaktorerna vid Forsmark och Ringhals samt 60 års drift av reaktorerna vid Oskarshamn. De mängder som detta scenario ger upphov till redovisas nedan.

Mycket lågaktivt avfall

Mycket lågaktivt avfall kategoriseras alltid som kortlivat och uppstår både under drift och vid rivning av kärnkraftverken. I dag deponeras detta avfall i markförvar. Avfallet utgörs huvudsakligen av förbrukade filter, utbytta komponenter, använda skyddskläder och sopor som plast, papper, kablar etc. Markförvar drivs i dag i avfallsproducenternas regi.

Låg- och medelaktivt avfall

Det låg- och medelaktiva avfallet indelas i kortlivat och långlivat avfall. Kortlivat avfall innehåller en signifikant mängd radionuklider med en halveringstid på maximalt 31² år och endast en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Långlivat avfall innehåller signifikanta mängder av radionuklider med långa halveringstider.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och vid rivning av kärntekniska anläggningar. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Rivningsavfallet består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Huvuddelen av det låg- och medelaktiva avfallet kommer från kärnkraftverken. Övrigt avfall kommer från Clab och Clink samt från Studsvik och SVAFO. Enligt gällande uppskattningar planerar SKB att slutförvara totalt cirka 200 000 m³ kortlivat radioaktivt avfall. Pågående rivningsstudier indikerar att avfallsvolymer kan komma att bli väsentligt mindre.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade hårdkomponenter och styrtavar. De långlivade nukliderna bildas av stabila grundämnen i till exempel stål när dessa utsätts för stark neutronstrålning från reaktorhärden.

Den totala mängden långlivat avfall uppskattas till cirka 10 000 m³, varav cirka hälften kommer från kärnkraftverken. Den andra hälften kommer från Studsvik och SVAFO. SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet i SFL, ett slutförvar för långlivat avfall.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat. Det utgör en mindre del av den totala mängden avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle är högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen planeras ske i Kärnbränsleförvaret.

Det använda bränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt). Resteffekten gör att bränslet kräver kylning för att inte överhettas. Resteffektens storlek beror på bränslets utbränning, det vill säga den energimängd som utvunnits ur bränslet. Utbränningen anges i megawattdygn per kilo uran (MWd/kgU). I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna har utbränningen av bränslet ökat successivt sedan reaktorerna togs i drift. Motivet till dessa förändringar är att få en så ekonomiskt fördelaktig drift av reaktorerna som möjligt. Kärnkraftsföretagen har i dag planer på att öka utbränningen ytterligare. I planeringen är det viktigt att klargöra konsekvenserna av en högre utbränning för KBS-3-systemets alla delar.

Enligt planeringsförutsättningarna kommer den totala mängd använt kärnbränsle som ska slutförvaras att omfatta cirka 6 000 kapslar. En kapsel innehåller cirka 2 ton bränsle. Mängden använt kärnbränsle anges som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet.

I den mängd använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret ingår, förutom allt använt bränsle från dagens svenska kärnkraftverk, även bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik samt så kallat Mox-bränsle (Mixed Oxide Fuel). Dessa bränsletyper utgör en mycket liten del av den totala mängden använt kärnbränsle. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från

² Kortlivat avfall definieras enligt IAEA:s ”Radioactive Waste Management Glossary, 2003 Edition” som avfall som inte innehåller signifikanta nivåer radionuklider med halveringstider längre än 30 år. SKB använder samma definition men med 31 år för att inkludera cesium-137, vilken används som nyckelnuklid för att uppskatta innehåll av andra radionuklider.

Ågesta samt cirka två ton använt kärnbränsle från Studsviks undersökningsverksamhet mellanlagras i dag i Clab.

I Clab lagras även 23 ton Mox-bränsle som har erhållits från Tyskland i utbyte mot det bränsle som i ett tidigt skede sändes till Frankrike (La Hague) för upparbetning. Sverige har även skickat använt bränsle för upparbetning till Sellafield i England. Vid upparbetning separeras uran, plutonium och avfallsprodukter. Uran och plutonium kan återanvändas och sättas in i nytt bränsle, Mox-bränsle. Åttio sådana bränsleelement har tillverkats och kommer att användas i Oskarshamns kärnkraftverk.

1.2 Beskrivning av avfallssystemet

1.2.1 Det svenska systemet

Figur 1-1 ger en översikt av systemet för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall. Bilden visar flödet från avfallsproducenterna via mellanlager och behandlingsanläggningar till olika typer av slutförvar. Heldragna linjer representerar transportflöden av radioaktivt avfall till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar.

Det svenska systemet kan delas in i två huvuddelar: systemet för omhändertagande av mycket lågaktivt och låg- och medelaktivt avfall samt systemet för omhändertagande av det använda kärnbränslet (KBS-3-systemet). Anläggningarna inom det förra drivs i både SKB:s och i avfallsproducenternas regi. Programmet för att realisera SKB:s planerade anläggningar inom detta system benämns Loma-programmet (låg- och medelaktivt avfall). Loma-programmet syftar även till att hålla samman planerings- och teknikfrågor för avvecklingen av kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Samtliga anläggningar inom KBS-3-systemet kommer att drivas av SKB. Programmet för att realisera de framtida anläggningarna inom detta system benämns Kärnbränsleprogrammet.

SKB svarar för transportsystemet, som är gemensamt för Loma- och Kärnbränsleprogrammen. Transporterna sker till sjöss, eftersom samtliga kärnkraftverk och kärnavfallsanläggningar ligger vid kusten. Transportsystemet består av det specialbyggda fartyget m/s Sigyn, olika typer av transportbehållare samt specialfordon för lastning och lossning. M/s Sigyn byggdes år 1982 och därefter har transportsystemet successivt byggts ut och kompletterats. För att öka sjösäkerheten har fartyget dubbla bottenar och dubbel bordläggning, vilket ger extra stor flytförmåga. Dessutom skyddar den dubbla bordläggningen lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Normalt gör fartyget, som drivs på entreprenad, mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken, Studsvik, SFR och Clab. SKB planerar att ersätta m/s Sigyn med ett nytt fartyg.

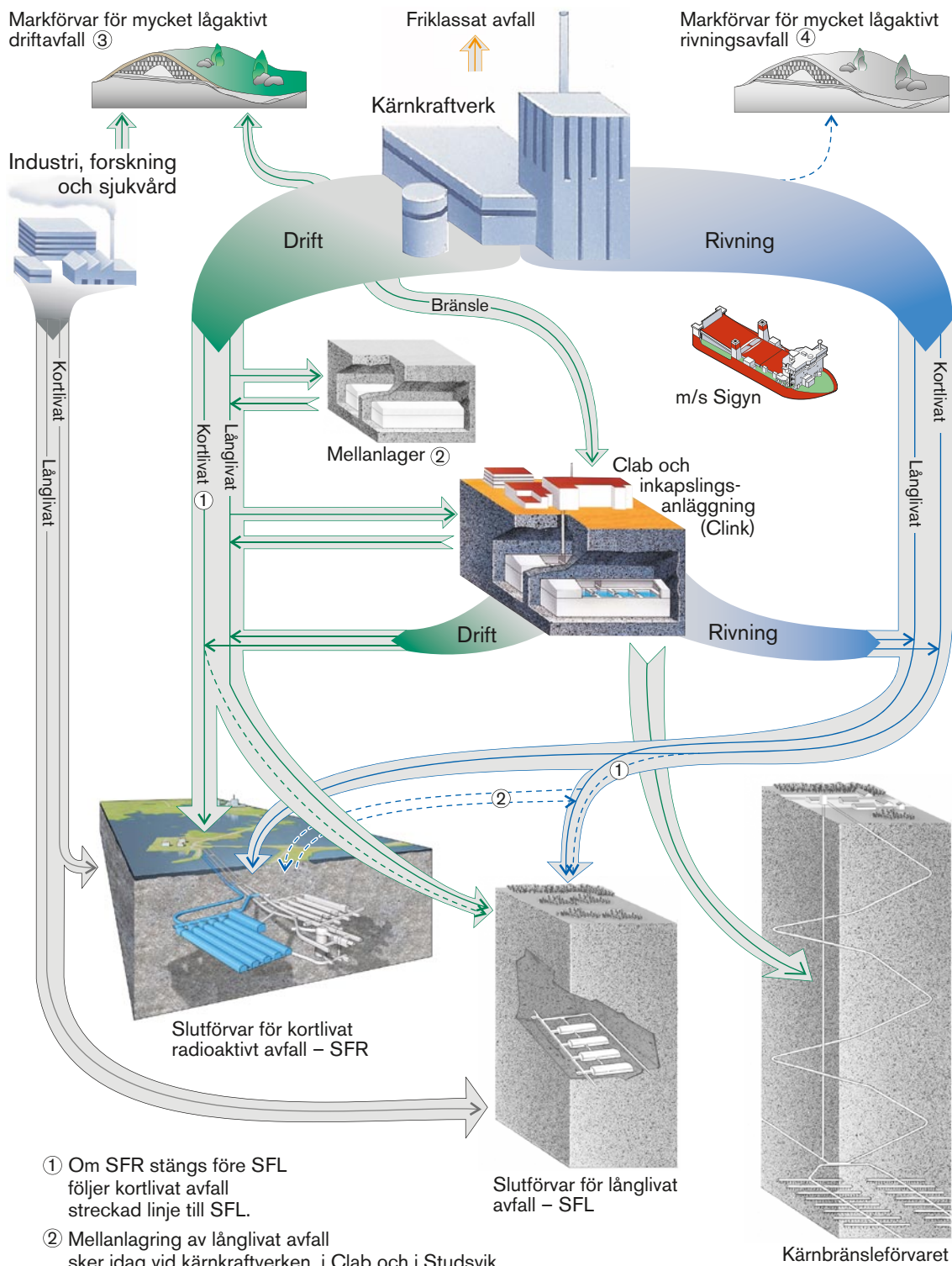
De två nästföljande avsnitten beskriver de anläggningar som behövs inom de båda systemen. Därefter beskrivs SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration.

1.2.2 Anläggningar inom systemet för mycket lågaktivt och låg- och medelaktivt avfall

För att på ett säkert sätt ta hand om mycket lågaktivt och låg- och medelaktivt avfall behövs anläggningar för mellanlagring, behandling och slutförvaring samt ett system för transporter. Inom systemet omhändertas både kortlivat och långlivat avfall. Anläggningarna drivs både i SKB:s och i avfallsproducenternas regi.

SKB:s slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, har varit i drift sedan år 1988. Kärnkraftsföretagen, SVAFO och Studsvik driver lokala behandlingsanläggningar, mellanlager och markförvar för kortlivat avfall.

I dag mellanlagras långlivat driftavfall vid kärnkraftverken, i Clab och i SVAFO:s mellanlager i Studsvik. SKB planerar för att slutförvara det långlivade avfallet i SFL (slutförvar för långlivat avfall).



- ① Om SFR stängs före SFL följer kortlivat avfall streckad linje till SFL.
- ② Mellanlagring av långlivat avfall sker idag vid kärnkraftverken, i Clab och i Studsvik. Mellanlagring av långlivat avfall kan även komma att ske i SFR.
- ③ Markförvar finns vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Liknande markförvar finns även i Studsvik, dit en del avfall från industri, forskning och sjukvård går.
- ④ Möjligt alternativ för mycket lågaktivt rivningsavfall. Beslut om markförvar är ännu ej fattat.

Figur 1-1. Systemet för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall och använda kärnbränsle.

Anläggningar för behandling av avfall

Vid kärnkraftverken och i Studsvik finns behandlingsanläggningar för mycket lågaktivt och låg- och medelaktivt avfall. Här behandlas och förpackas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för att deponera avfallet i SFR eller i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara volymreduktion, koncentrerings av aktiviteten eller solidifiering.

Markförvar

Markförvar för mycket lågaktivt driftavfall finns på industriområdena vid kärnkraftverken Forsmark, Oskarshamn och Ringhals samt i Studsvik. Innan dessa togs i drift deponerades detta avfall i SFR.

Efter cirka 50 år har radioaktiviteten i avfallet sjunkit till samma nivå som i den omgivande naturen och avfallet är då inte längre farligt ur strålningssynpunkt.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR

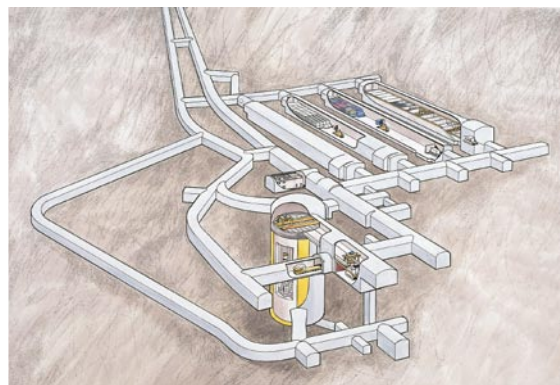
SFR är lokaliserat vid Forsmarks kärnkraftverk, se figur 1-2. Förvaret är placerat under Östersjön med cirka 60 meter bergtäckning. Från hamnen i Forsmark leder två stycken en kilometer långa tillfartstunnlar till förvarsområdet.

Förvarsutrymmena utgörs i dag av fyra 160 meter långa berggrum i olika utförande och ett 70 meter högt berggrum där en betongsilo byggts. Anläggningens totala lagringskapacitet är 63 000 m³. I ett av de fyra bergrummen förvaras lågaktivt avfall inneslutet i transportcontainrar enligt ISO-standard. Avfallet i detta berggrum kan hanteras utan strålskärning. Tre av bergrummen tar emot medelaktivt avfall som kräver strålskärning. Betongsilon är även den avsedd för medelaktivt avfall. Silon kommer att innehålla huvuddelen av de radioaktiva ämnena i SFR.

I dag slutförvaras endast driftavfall från kärnkraftverken, Clab, Studsvik och SVAFO i SFR. Vid årsskiftet 2009/2010 hade 33 300 m³ avfall deponerats i SFR.



Vy över ovanmarksdelen



SFR under mark



Bergrum för medelaktivt avfall



Vy över silotopp

Figur 1-2. Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall, SFR.

För att kunna slutförvara allt tillkommande kortlivat drift- och rivningsavfall planerar SKB en utbyggnad av SFR.

Mellanlager för långlivat avfall

I dag mellanlagras den största delen av det långlivade avfallet i förvaringsbassänger på kraftverken och i Clab. Därutöver använder OKG Aktiebolag ett bergrum på Simpevarpshalvön (BFA) för torr mellanlagring av driftavfall. Drifttillståndet innehas av OKG Aktiebolag, men BFA är licenserat för mellanlagring av hårdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. Även Forsmarks Kraftgrupp AB har ett torrt mellanlager på sitt kraftverksområde.

SKB planerar för att kunna mellanlagra långlivat avfall i det utbyggda SFR och utreder därför möjligheterna för detta.

Förutom avfall från kraftverken finns det långlivat avfall som härrör från forskning. Detta avfall tillhör SVAFO och Studsvik och mellanlagras i anläggning i Studsvik.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL

SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet i en anläggning som liknar SFR, men som troligtvis kommer att förläggas på ett större djup. Förvaret kommer att vara den anläggning som tas sist i drift. Ett förvarskoncept kommer att utvecklas under perioden fram till år 2013. Även lokaliseringen av förvaret är i dag en öppen fråga.

SFL:s förvarsvolym kommer att vara relativt liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar. Den totala lagringsvolymen uppskattas till 10 000 m³.

Transportsystem för låg- och medelaktivt avfall

Transportsystemet består av fartyget m/s Sigyn, specialfordon och olika typer av transportbehållare.

Kortlivat avfall transporteras i dag från kärnkraftverken och Clab till SFR. Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärning. Det kan därför transporteras i ISO-containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärning och merparten gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Därefter transporteras avfallet i transportbehållare (ATB) med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt det är, se figur 1-3.



Figur 1-3. Transportbehållare för kortlivat radioaktivt avfall (ATB).

I dag transporteras långlivat avfall från kärnkraftverken till Clab. Avfallet består av styrvastav från kokvattenreaktorer och utbytta hårdkomponenter. Avfallet transporteras i en behållare (TK) med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål, se figur 1-4. Behållaren är anpassad till Clabs lagringskassetter. En ny avfallstransportbehållare (ATB 1T) håller på att tas fram för att kunna transportera långlivat avfall i så kallade BFA-tankar avsedda för torr mellanlagring.

M/s Sigyn och fordonen används också för transporter av använt kärnbränsle inom KBS-3-systemet.

1.2.3 Anläggningar inom KBS-3-systemet

SKB:s mellanlager för använt kärnbränsle, Clab, har varit i drift sedan år 1985. SKB planerar att bygga ut Clab med en anläggningsdel för inkapsling av kärnbränslet samt att bygga ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, i Forsmark. Förutom dessa anläggningar planerar vi att bygga en kapselabrik för montering av kopparkapslarna i Oskarshamn.

Centralt mellanlager för använt bränsle, Clab

Clab är lokaliserat vid kärnkraftverken i Oskarshamn. Det använda kärnbränslet mellanlagras i anläggningens vattenbassänger, se figur 1-5. Clab består av en mottagningsdel i marknivå och en förvaringsdel drygt 30 meter under markytan. I mottagningsdelen tas transportbehållarna med det använda kärnbränslet emot och lastas ur under vatten. Bränslet placeras därefter i lagringskassetter. Två typer av kassetter, normalkassetter och kompaktkassetter, används.

Själva lagringsutrymmet består av två bergrum med cirka 40 meters avstånd som förbinds med en vattenfylld transportkanal. Varje bergrum är ungefär 120 meter långt och innehåller fyra lagringsbassänger och en reservbassäng. Vattnet i bassängerna tjänar både som strålskärm och kylmedel. Bränslets överkant står åtta meter under vattenytan. Vid bassängkanten är strålningsnivån så låg att personalen kan vistas där utan restriktioner.

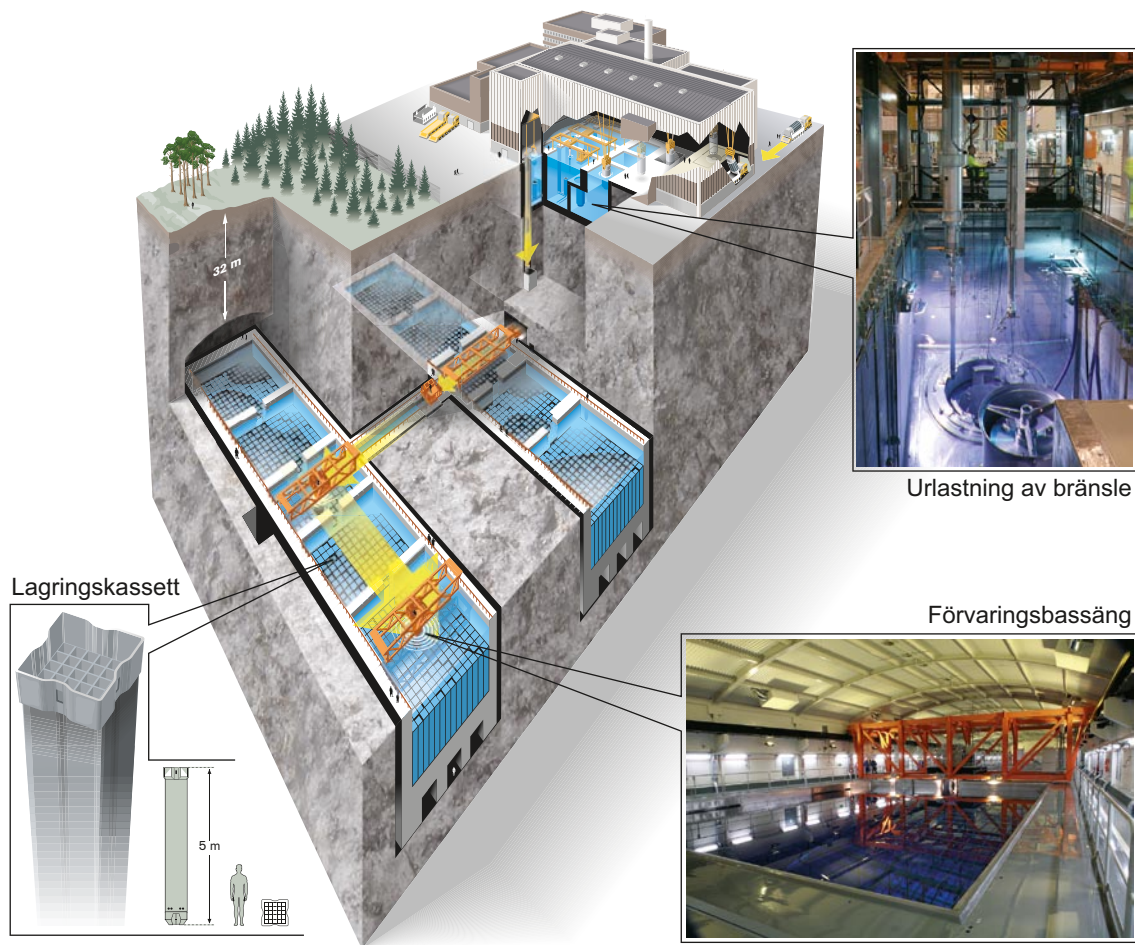
Vid årsskiftet 2009/2010 fanns 5 050 ton bränsle (räknat som ursprunglig mängd uran) i anläggningen. SKB har tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle i anläggningen men kan vid en övergång till att använda endast kompaktkassetter i bassängerna öka lagringskapaciteten till 10 000 ton bränsle.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av det använda kärnbränslet, Clink

Innan det använda bränslet deponeras ska det kapslas in i kopparkapslar. SKB planerar att kapsla in bränslet i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab. När denna inkapslingsdel sammankopplats med Clab kommer de båda anläggningsdelarna att drivas som en integrerad anläggning, Clink.



Figur 1-4. Transportbehållare för hårdkomponenter (TK).



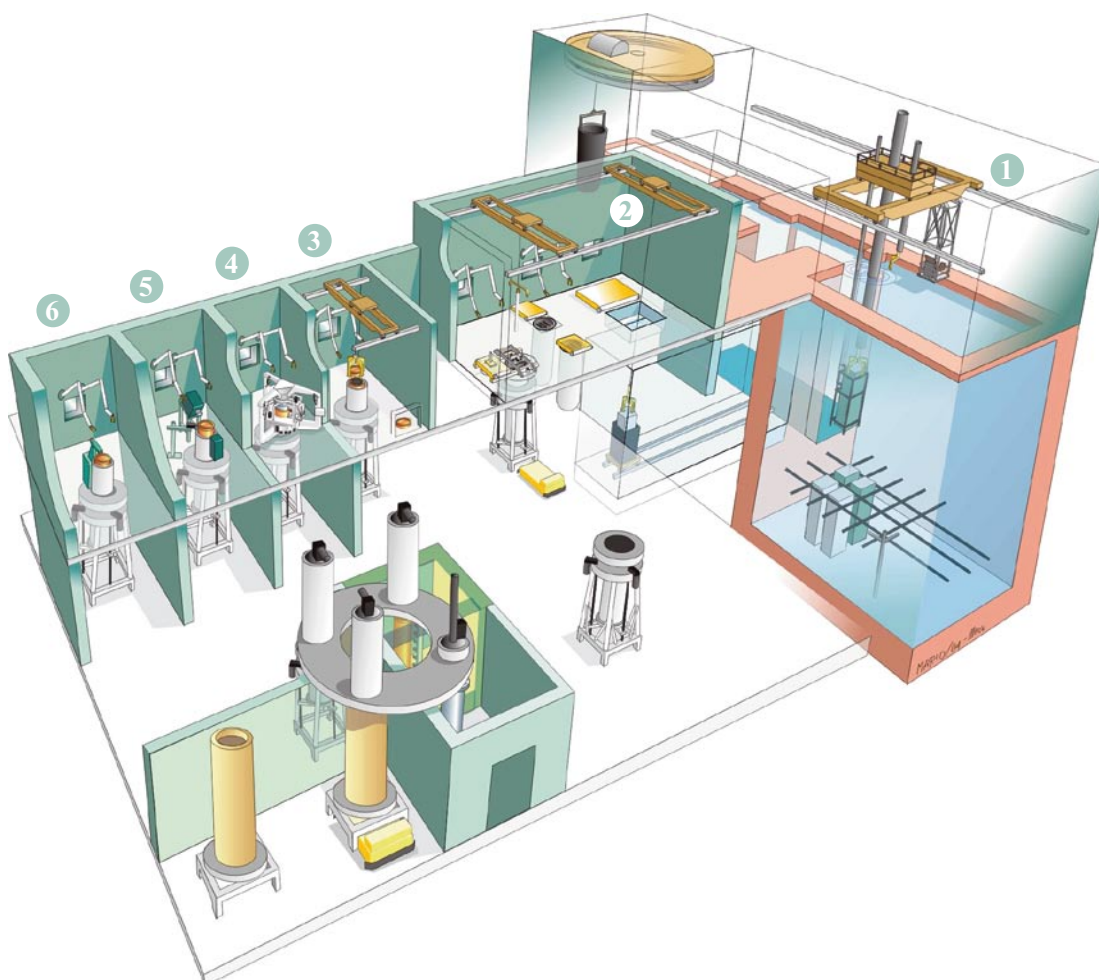
Figur 1-5. Det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, Clab.

Kapseln som ska användas består av ett kopparhölje som ska skydda mot korrosion och en insats av segjärn som ska motstå mekaniska belastningar, se figur 1-6. Det finns två typer av insatser, en som rymmer tolv element från kokvattenreaktorer (BWR) och en som rymmer fyra element från tryckvattenreaktorer (PWR). Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras, se avsnitt 1.1.3. Dessa kan placeras i någon av de två insatstyperna. Enligt planerna kommer SKB att bygga en så kallad kapselfabrik för montering och finbearbetning av kapselns olika komponenter i Oskarshamn. Kapselfabriken kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning.

I Clink kommer det att finnas ett antal stationer för olika arbetsmoment, se figur 1-7. All hantering av bränslet manövreras på avstånd. Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet förs från förvaringsbassängerna under mark till bassänger i den nya anläggningsdelen. De bränsleelement som ska placeras tillsammans i en kapsel väljs ut på ett sådant sätt att den totala värmeeffekten i kapseln inte blir för stor. Bränslet torkas därefter i en strålskärmad hanteringscell och lyfts över till kapseln. Luften i kapseln byts ut mot argon innan den försluts. Förslutningen av kopparkapseln görs med en form av friktionssvetsning (friction stir welding). Svetsens kvalitet kontrolleras och om svetsen blir godkänd förs kapseln vidare till stationen för maskinbearbetning, där överskottsmaterialet bearbetas bort. Slutligen görs en ny kvalitetskontroll av svetsen. Vid behov rengörs kapseln innan den placeras i en speciell transportbehållare för transport till Kärnbränsleförvaret.



Figur 1-6. Kopparkapsel med insats av segjärn (det infällda fotot visar kopparlocket).



- 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. Kontroll av svetsarna.
- 6 = Maskinbearbetning.

Figur 1-7. Arbetsstationerna i Clinks inkapslingsdel.

Kärnbränsleförvaret

Arbetet med att finna en lämplig plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle har pågått i flera decennier. I slutet av platsvalsprocessen stod valet mellan Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Efter utvärderingar av platsundersökningarna valde SKB under år 2009 Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle.

Slutförvarsanläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel, se figur 1-8. Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden samt förbindelser till ovanmarksdelen i form av en ramp för fordonstransporter samt schakt för hissar och ventilation. Deponeringsområdena, som tillsammans utgör förvarsområdet, kommer att ligga cirka 470 meter under marknivån och bestå av ett stort antal deponeringstunnlar med borrade deponeringshål i botten på tunnarna. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen, bestäms utifrån bergets egenskaper, exempelvis sprickbildningar och termiska egenskaper. Anläggningen ovan mark omfattas av driftområde, bergupplag, ventilationsstationer och förråd.

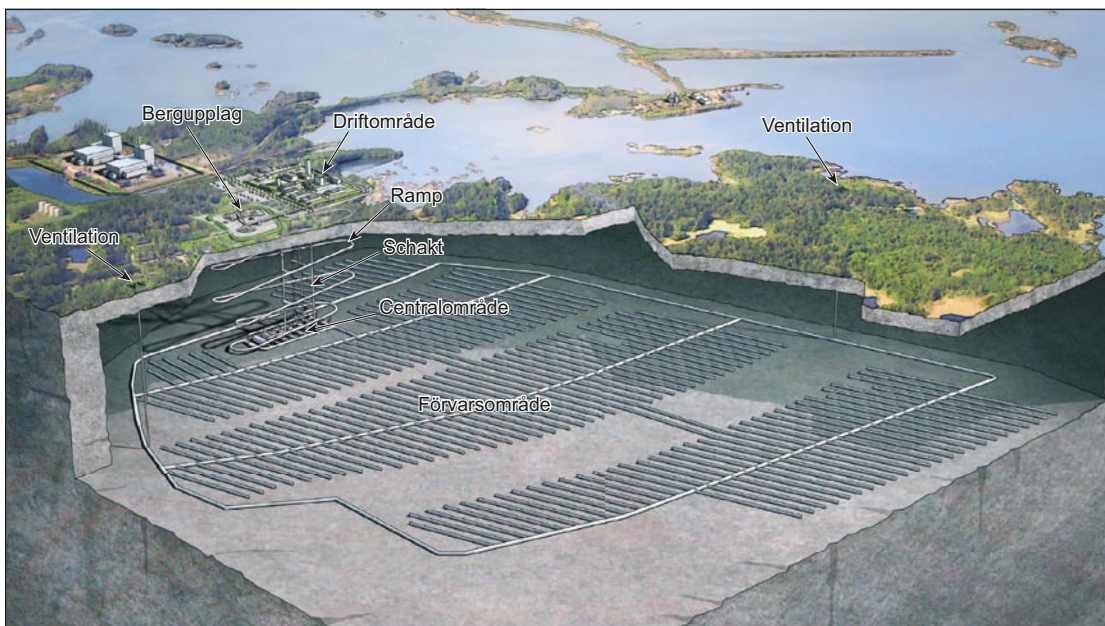
När kapslarna anländer till Kärnbränsleförvaret lastas de om till ett specialbyggt transportfordon som via rampen för ner kapslarna till deponeringsnivån. Därefter lastas kapslarna om till deponeringsmaskinen för att transporteras ut till deponeringsområdet och slutligen deponeras. Efter att kapslarna 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). Referensutformningen av KBS-3-metoden bygger på vertikal deponering, men SKB utreder även möjligheten att i ett senare skede övergå till horisontell deponering. Det utvecklingsarbete som pågår med horisontell deponering visar att tekniken är intressant och lovande, men att det krävs mer forskning och utveckling på området innan den kan anses tillgänglig.

Transportsystem för använt kärnbränsle

Transportsystemet består av fartyget m/s Sigyn, specialfordon och olika typer av transportbehållare.

Det använda bränslet transporteras i dag från kärnkraftverken till Clab i behållare (TB) med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar, se figur 1-9. Dessa behållare är försedda med kylflänsar för att kyla bort den värme som alstras på grund av bränslets resteffekt.



Figur 1-8. Kärnbränsleförvaret i Forsmark.



Figur 1-9. Transportbehållare för bränsle (TB).

För transport av inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret kommer en ny typ av transportbehållare (KTB) att tas fram.

M/s Sigyn och fordonen används också för transporter av låg- och medelaktivt avfall inom Loma-systemet.

1.2.4 Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

Forskning och utveckling för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle behöver i många delar utföras i en realistisk miljö och i full skala. För detta ändamål har SKB tre laboratorier: Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet. Där utför vi forsknings- och utvecklingsprojekt främst för barriärerna i KBS-3-förvaret. Resultaten från försöken och projekten i de tre laboratorierna ger underlag för utformningen av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen samt till de säkerhetsanalyser som ska genomföras.

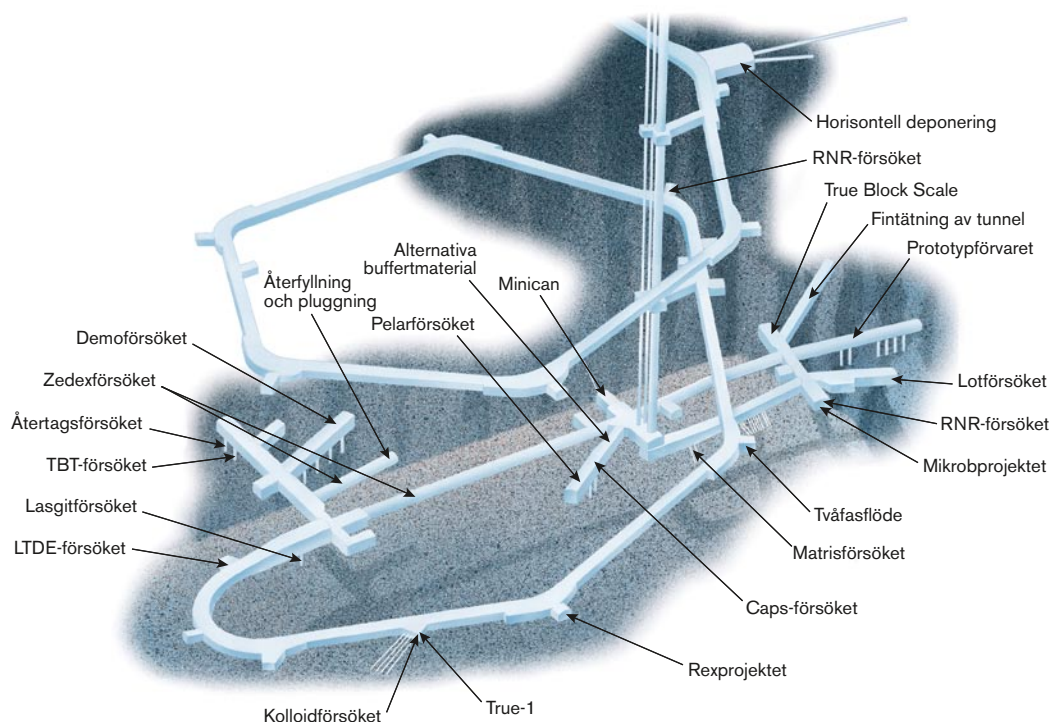
Laboratorierna ger också en möjlighet att demonstrera att barriärerna kan tillverkas och installeras med den kvalitet som krävs för att uppfylla kraven på långsiktig säkerhet. Detta är en viktig del av arbetet med att visa att slutförvarets initialtillstånd, som utgör utgångspunkten för analysen av den långsiktiga säkerheten, kan uppnås.

Tillgången till laboratorierna har hittills haft en central betydelse för utvecklingen av KBS-3-metoden samt i arbetet med att informera om de framsteg som fortlöpande uppnås i verksamheten.

Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet, som anlades under perioden 1990–1995, är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk. 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 nischer och korta tunnlar som grenar ut från huvudtunneln. En illustration över laboratoriet visas i figur 1-10.

Laboratoriet används till att undersöka hur barriärerna i slutförvaret för använt kärnbränsle (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.



Figur 1-10. Äspölaboratoriet.

Ett annat viktigt syfte är att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva Kärnbränsleföret. Här finns alla KBS-3-metodens delsystem tillgängliga för demonstration i realistisk miljö.

Anläggningen kommer i framtiden att användas för att utbilda och träna den personal som ska arbeta i Kärnbränsleföret. SKB räknar därför med att laboratoriet kommer att vara i drift åtminstone fram till dess Kärnbränsleföret tas i drift.

För de kommande säkerhetsanalyserna av SFR och SFL kan forskningsexperiment liknande de som i dag genomförs för Kärnbränsleföret komma att behövas. Osäkerheter i underlagen för analyserna visar vilka frågeställningar som kan bli aktuella. Vi förutser att de yttligare delarna av anläggningen kan tillgodose försök för SFR:s behov, medan de djupare passar för SFL.

Flera olika länder och organisationer deltar i de försök som görs vid Äspölaboratoriet. I olika former och projektgrupper arbetar vi tillsammans med systerorganisationer, forskningsinstitut och universitet i bland annat Finland, Frankrike, Japan, Kanada, Schweiz, 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 ger oss också möjlighet att anlita välrenommerade experter inom olika områden.

Kapsellaboratoriet

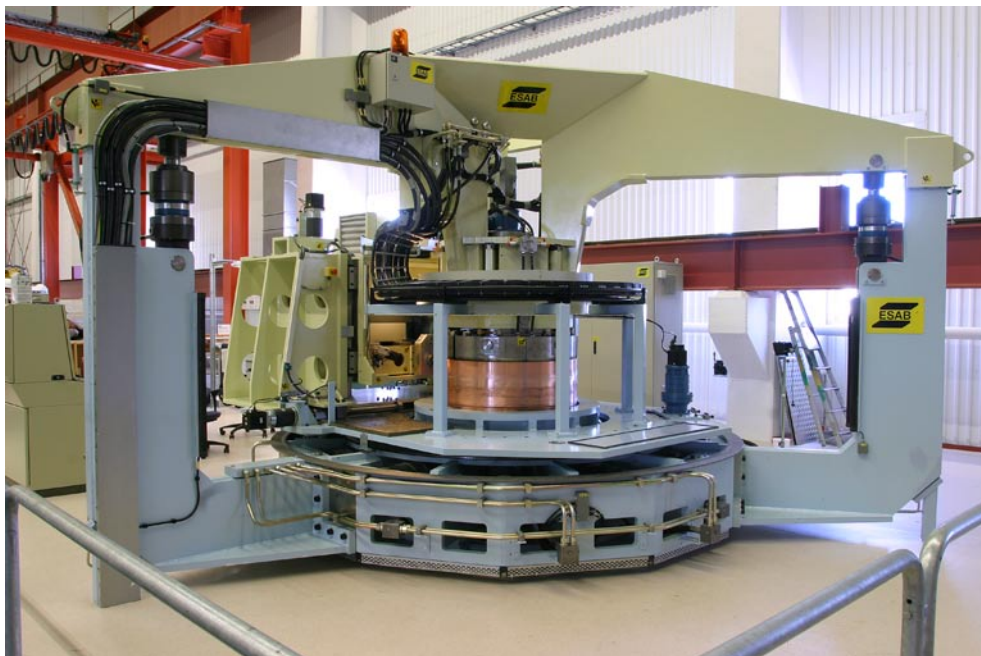
Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. En av varvets gamla svetshallar har byggts om för att användas vid utvecklingen av förslutningstekniken för kopparkapslar. I första hand är det utrustning för svetsning av kopparlock och -bottnar samt utrustning för oförstörande provning av svetsarna och kapselns olika delar som utvecklas där. Men även utrustning och system för att hantera använt kärnbränsle och kapslar testas och utvecklas i laboratoriet. Anläggningen kommer också att användas för utbildning av personal inför driftsättningen av inkapslingen i Clink. Kapsellaboratoriet ska därför enligt planerna vara i bruk fram till dess att inkapslingen av det använda kärnbränslet påbörjas.

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 Clink. De viktigaste utrustningarna som finns i laboratoriet är friktionssvets, elektronstrålesvets, röntgen och ultraljud. Figur 1-11 visar utrustningen för friktionssvetsning.

Bentonitlaboratoriet

Sedan år 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i Bentonitlaboratoriet i Oskarshamn, se figur 1-12. Anläggningen ligger i anslutning till Äspölaboratoriet och kompletterar de försök som görs där.

Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet bygger på flera barriärer som ska hindra frigjorda radioaktiva ämnen från kapseln att nå markytan. En av barriärerna är den svällande lera, bentonit, som ska omge kapseln. Bentonitliknande lera kommer även att användas för återfyllnad av tunnarna i förvaret. I Bentonitlaboratoriet testas vi bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. I laboratoriet utvecklar SKB även metoder för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnarna.



Figur 1-11. Kapsellaboratoriets utrustning för utveckling av friktionssvetsning (friction stir welding).



Figur 1-12. Bentonitlaboratoriet.

1.3 Program för forskning, utveckling och demonstration

Kärntekniklagen (KTL) reglerar Fud-programmets periodicitet och omfattning. Programmet ska dels innehålla en översikt över samtliga åtgärder som kan bli behövliga för att ta hand om det radioaktiva avfallet, dels närmare redovisa de åtgärder som avses bli vidtagna inom en tidsrymd om minst sex år. Strålskyddsmyndigheten granskar och utvärderar programmet avseende planerad forsknings- och utvecklingsverksamhet, redovisade forskningsresultat, alternativa hanterings- och förvaringsmetoder samt planerade åtgärder. Efter en omfattande remissbehandling överlämnar SSM ärendet till regeringen som fattar beslut om programmets godkännande och om eventuella riktlinjer avseende den fortsatta verksamheten.

Utvecklingen av KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle har pågått sedan slutet av 1970-talet. Metoden redovisades år 1983 i en rapport som utgjorde underlag för ansökningarna om att ta de senast byggda kärnkraftsreaktorerna i drift. Sedan den nya kärntekniklagen trätt i kraft i februari 1984 kompletterades ansökningarna med SKB:s FoU-program 84, som därmed också blev ett ansökansunderlag. Regeringen gav i juni 1984 kärnkraftsföretagen laddningstillstånd för reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3. I beslutet skrev regeringen att KBS-3-metoden ”i sin helhet i allt väsentligt befunnits kunna godtas med hänsyn till säkerhet och strålskydd”. KBS-3-metoden har sedan dess legat till grund för SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration. Parallellt har SKB följt utvecklingen av andra metoder och vid ett antal tillfällen utvärderat dessa i förhållande till KBS-3-metoden.

Fud-programmets fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s verksamhet har legat. Nedan ges en kort sammanfattning av de Fud-program som SKB hittills har presenterat. Samtliga 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 sitt första forskningsprogram enligt kärntekniklagen, FoU-program 84, 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, FoU-program 86. De riktlinjer som forskningen inom SKB har följt sedan KBS-3 summerades och utvecklades på bland annat följande sätt:

- De radioaktiva restprodukterna ska omhändertas i Sverige.
- Det använda kärnbränslet ska mellanlagras och slutförvaras utan upparbetning.
- Avfallsfrågan ska till alla väsentliga delar lösas av den generation som utnyttjar elproduktionen från kärnkraftverken.
- Verksamheten ska bedrivas öppet och med god insyn från samhällets sida.

I enlighet med kärntekniklagens krav pekade SKB på vikten av alternativstudier, och gick i en underlagsrapport till programmet igenom metoder som kunde ses som alternativ till KBS-3-metoden.

SKB föreslog att ett nytt berglaboratorium skulle byggas i ostört berg för att göra det möjligt att även i fortsättningen studera bergets geologiska och hydrogeologiska egenskaper samt nuklidtransport i verklig skala. Forskningsverksamheten vid Stripagruvan planerades att avslutas.

Flertalet remissinstanser ansåg att programmet var väl avvägt och överensstämde med kärntekniklagens krav. Statens Kärnkraftinspektion (SKI) menade att deponering av långlivat avfall på stort djup (flera hundra meter eller mer) i kontinentala geologiska formationer är den enda metod som inom överskådlig tid bedöms tillgänglig och genomförbar i Sverige.

FoU-program 89

SKB framhöll i FoU-program 89, att 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 sätt att omhänderta det använda kärnbränslet. En jämförelse redovisades mellan KBS-3 och en alternativ utformning för geologisk deponering betecknad WP-Cave. SKB bedömde att det är svårare att visa att WP-Cave metoden är långsiktigt säker och studierna av WP-Cave som ett sammanhållet system avslutades därför.

I programmet 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 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

Kärnavfallsprogrammet konkretiserades i Fud-program 92 genom att SKB presenterade en plan för att realisera en djup geologisk förvaring av inkapslat använt bränsle. Det utgjorde starten för lokaliseringen av ett slutförvar. Inriktningen för inkapslingsanläggningen var att den ska byggas vid Clab. Förslaget från Statens kärnbränslenämnd, SKN, att förvaret ska byggas stegvis togs, enligt regeringens önskemål, upp och infördes i programmet. I ett första steg planerades demonstrationsdeponering för cirka 400 kapslar. Efter detta ska det vara möjligt att fortsätta på den inslagna linjen eller att återta bränslet.

Viktiga underlag till programmet var säkerhetsanalysen SKB 91 /1-2/ och den så kallade PASS-rapporten /1-3/, som jämförde olika inkapslingsmetoder och slutförvaringsmetoder (KBS-3, djupa borrhål, långa tunnlar, medellånga tunnlar). PASS-rapporten förordade ett bibehållet referenssystem enligt KBS-3 med en kopparkapsel med insats av stål.

I sin utvärdering av programmet godtog Statens kärnkraftinspektion, SKI, att de fortsatta Fud-insatserna huvudsakligen inriktas på en metod av typ KBS-3. SKI konstaterade att det inte finns någon metod som förefaller väsentligt bättre ur säkerhetssynpunkt och som kan förverkligas i Sverige utan att avsevärt utsträcka tidsramen jämfört med SKB:s planer.

I regeringens beslut ställdes krav på 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.

Kompletterande redovisning till Fud-program 92

SKB lämnade den begärda kompletteringen i augusti 1994. I sitt följande beslut klaggjorde 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.

Regeringen ansåg också att SKB, för att ge bakgrund och förutsättningar i lokaliseringsarbetet, borde presentera sina översiktsstudier och platsanknutna förstudier i en samlad redovisning i kommande Fud-program.

Fud-program 95

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

- Redovisningarna av förstudierna i Storuman och Malå.
- Översiktsstudie 95 – En rikstäckande genomgång av förutsättningar och bakgrund för lokaliseringsarbetet /1-4/.
- En mall för säkerhetsrapporter, SR 95 /1-5/.

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

I Fud-program 98 redovisade SKB ett ingående underlag på de punkter som regeringen hade lyft fram vid behandlingen av Fud-program 95, det vill säga alternativa lösningar till KBS-3-metoden, systemanalys av hela slutförvarssystemet, lokaliseringsunderlag och platsvalskriterier.

Beträffande alternativa lösningar innehöll 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 planerades inför kommande platsundersökningar fram till beslut år 2001. I programmet specificerades också referens kapseln 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.

Kompletterande redovisning till Fud-program 98

I november 1999 redovisade SKB säkerhetsanalysen SR 97 /1-6/. SKI och SSI konstaterade i sin gemensamma granskning att den innehöll de beståndsdelar som krävs för en allsidig belysning av säkerhet och strålskydd. Myndigheterna ansåg vidare att KBS-3-metoden är en god grund för SKB:s kommande platsundersökningar och den fortsatta utvecklingen av de tekniska barriärerna.

I december 2000 lämnade SKB de kompletterande redovisningar som regeringen begärde i sitt beslut över Fud-program 98 beträffande alternativa metoder, underlag för val av platser och program för platsundersökningarna. Redovisningen (ofta benämnd Fud-K) innehöll en fyllig sammanfattning och utvärdering av det omfattande lokaliseringsunderlag som SKB tagit fram genom åren. I programmet redovisade SKB sitt val av platser för platsundersökningar samt ett översiktligt program för platsundersökningsskedet. Regeringens beslut innebar klartecken för SKB att fortsätta arbetet enligt redovisningen i Fud-K. Regeringen hade inget att invända mot att SKB inledde platsundersökningar inom de tre områdena Simpevarp, Forsmark och Tierp norra. Regeringen gjorde också bedömningen att KBS-3-metoden skulle användas som planeringsförutsättning för platsundersökningarna.

Fud-program 2001

Fud-program 2001 koncentrerades på frågor relaterade till säkerhetsanalysen och dess behov av forskning och teknikutveckling. Frågor om lokalisering av inkapslingsanläggningen och slutförvarsanläggningen togs inte upp, eftersom SKB vid denna tid väntade på regeringens beslut med anledning av kompletteringen av Fud-program 98. I programmet utgick vi 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. I Fud-program 2001 ingick även redogörelser för kunskapsläget kring bland annat transmutation av använt kärnbränsle och deponering i djupa borrhål.

I programmet fanns också en tidsplan där utgångspunkten var att platsundersökningar för ett slutförvar för använt kärnbränsle skulle inledas under år 2002. Planen innebar att reguljär drift (nuvarande benämning rutinmässig drift) kan inledas i början av 2020-talet innan förvarings-bassängerna i Clab är fyllda. På så sätt undviks en ytterligare utbyggnad. Inkapslingsanläggningen ska enligt planerna stå driftklar ett år före slutförvarsanläggningen. I tidsplanen ingick även att genomföra säkerhetsanalyser av slutförvaret, baserade på data från platsundersökningsskedet.

I sitt yttrande över Fud-program 2001 efterfrågade SKI och SSI en redogörelse som tydligare klargör planeringen för återstoden av kärnavfallsprogrammet. Regeringen begärde sedan en handlingsplan i samband med att forskningsprogrammet godkändes.

Fud-program 2004

Inriktningen av Fud-program 2004 var främst att belysa utvecklingen av tillverkning och förslutning av kapslar för slutförvaring av använt bränsle. Anledningen var att SKB skulle lämna in en ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen för en inkapslingsanläggning under den följande programperioden.

SKB presenterade den handlingsplan som efterlystes i granskningen av Fud-program 2001. Planen delades in i två delar: KBS-3-systemet (Kärnbränsleprogrammet) 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 slutförvarsanläggningen. SKI ansåg i sitt yttrande över Fud-program 2004 att handlingsplanen 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.

Fud-program 2007

Genom Fud-program 2007 lades nästa stora mål fast, nämligen att inlämna en ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret för använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken (MB) för hela KBS-3-systemet. Planerna för dessa delar av Kärnbränsleprogrammet redovisades strukturerat med utgångspunkt från det stegvisa genomförandet av programmet som beskrivits i SKB:s handlingsplan.

I programmet beskrevs teknikutvecklingen avseende de olika systemdelarna i slutförvaret. Deras egenskaper bestäms av de konstruktionsförutsättningar och specifikationer som tagits fram, men även av de produktions- och kontrollmetoder som används. För beskrivningarna definierades sex så kallade produktionslinjer: berg-, buffert-, bränsle-, kapsel-, återfyllnings- och förslutningslinjerna. Dessutom behandlades återtag av kapslar och en variant av förvarsutformningen med horisontell deponering (KBS-3H).

I Fud-program 2007 togs även den långsiktiga säkerhetsanalysen upp, med hänvisning till säkerhetsanalysen SR-Can som lämnades till myndigheterna i november 2006. Vidare redovisades insatserna för forskning inom det samhällsvetenskapliga området, programmet för omhändertagandet av låg- och medelaktivt avfall från kärnkraftverken (Loma) samt rivning av kärntekniska anläggningar.

Regeringen krävde i sitt beslut kompletterande redovisningar avseende slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL), slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall (SFR), rivning samt alternativa metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle.

Kompletterande redovisning till Fud-program 2007

SKB lämnade i mars 2009 in den efterfrågade kompletterande redovisningen av dels Loma-programmet och rivningen, dels kunskapsläget om alternativa slutförvaringsmetoder.

Vid sin granskning fann SSM att SKB:s redovisning inom vissa områden inte fullt ut motsvarade myndighetens förväntningar men SSM bedömde att kompletteringen av Fud-program 2007 kunde avslutas utan vidare åtgärd. Regeringen instämde i SSM:s bedömning, konstaterade att myndigheten påbörjat en dialog med SKB och tillståndshavarna och förutsatte att SKB kommer att ta hänsyn till myndigheternas synpunkter i Fud-program 2010.

1.4 Kompetens och organisation

SKB står inför nya utmaningar i och med att de planerade anläggningarna successivt realiserar. En viktig del i att klara dessa utmaningar är att kontinuerligt utveckla vår kompetens och organisation. Historiskt sett har SKB varit en managementorganisation med ett antal experter som haft till uppgift att leda och styra arbetet. Detta har successivt förändrats mot en bredare bemanning och vi driver nu anläggningarna i egen regi och har nu fler egna specialister och handläggare.

SKB tog över driften av Clab i januari 2007 och driften av SFR i juli 2009. Tidigare drevs anläggningarna på entreprenad av OKG Aktiebolag respektive Forsmarks Kraftgrupp AB. Övertagandet är en naturlig del i SKB:s utveckling där tyngdpunkten av verksamheten successivt övergår från forskning och utveckling till drift av kärntekniska anläggningar. De erfarenheter vi fått genom uppförande och drift av Clab och SFR är viktiga i planeringen av de framtida anläggningarna.

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

SKB har genomfört en studie i syfte att föreslå åtgärder och en handlingsplan för att utveckla organisationen under perioden fram till dess att Kärnbränsleförvaret och Clink tas i drift. Studien genomfördes i två steg. Som ett resultat av det första steget, som genomfördes under 2005–2006, etablerades de två programmen: Loma-programmet och Kärnbränsleprogrammet. Inom dessa utförs den verksamhet som krävs för att realisera de framtida anläggningarna.

Det andra steget i organisationsstudien genomfördes under 2007–2008 och där utarbetades mer detaljerade förslag på hur SKB bör organiseras. De flesta av förslagen har därefter successivt implementerats. Bland annat bildade SKB under år 2009 en avdelning för hanteringen av låg- och medelaktivt avfall. En successiv uppbyggnad av kompetensen inom avdelningen för att genomföra utbyggnaden av SFR och planeringen för SFL pågår.

Som ett annat resultat av studien pågår en uppbyggnad av kompetens för anläggningsteknik, konstruktionsteknik och tvärteknik. Tidigare har denna kompetens hämtats externt, främst från OKG. Kompetensuppbyggnaden sker inledningsvis inom Driftavdelningen. Syftet är att denna kompetens på sikt ska utnyttjas inom hela SKB.

SKB förstärker sig även inom andra kompetensområden såsom upphandling, projektledning och informationshantering och arbetar aktivt med att ta fram riktlinjer för hur vi ska använda konsulter och nyckelkompetenser som del av vår kompetensförsörjning.

SKB:s ledningssystem utgör ett viktigt verktyg som behövs för att vi ska kunna bygga och driva de planerade anläggningarna. Ledningssystemet är certifierat enligt kvalitetslednings- och miljöledningsstandarderna ISO 9001 och ISO 14001. Dessutom lever ledningssystemet upp till alla de krav som ställs i SSM:s föreskrifter för att driva kärnteknisk verksamhet. Ledningssystemet utvecklas successivt i takt med att verksamheten förändras.

1.5 Kravhantering

En av förutsättningarna för att kunna bygga och driva anläggningarna är att de uppfyller de krav som SKB, myndigheterna och andra intressenter ställer. För att säkerställa detta tillämpar SKB en systematisk kravhantering /1-7/. Metodiken utvecklades ursprungligen för utformningen av Kärnbränsleförvaret och används nu även för utbyggnaden av SFR. Ett övergripande syfte är att underlätta systemförståelsen genom att detaljerna i utformningen sätts in i sitt sammanhang och kan härledas till ställda krav. Ett annat viktigt syfte är att göra underlag och motiv för förvarens utformning spårbara.

Metodiken innebär att konstruktionsförutsättningarna dokumenteras i en databas och struktureras i nivåer som motsvarar olika detaljeringsgrader i utformningen. Varje nivå kan ses som en specifikation av förvaren och deras utformning. På den översta nivån specificeras den fråga som ska lösas och grundläggande krav och principer för slutförvarets utformning anges. På de två nästkommande nivåerna, nivå två och tre, specificeras de funktioner och egenskaper som hela slutförvaret respektive dess delar ska ha för att lösa frågan och svara mot principerna. Här anges också vilka överväganden som ska göras vid utformningen, till exempel tillämpning av beprövad och tillförlitlig teknik och begränsning av miljöpåverkan. På de båda nästföljande nivåerna specificeras detaljerade konstruktionsförutsättningar respektive referensutformning. Den slutliga referensutformningen kommer att utgöra underlag för tillverknings- och kontrollspecifikationer.

Genom att relatera varje detaljerad konstruktionsförutsättning till en mer övergripande visar kravhanteringssystemet hur SKB har tagit hänsyn till författningarnas övergripande krav och omsatt dem i den faktiska utformningen.

Kravhanteringen omfattar även rutiner för hur konstruktionsförutsättningar och referensutformning ska beslutas och granskas. Rutiner för hur verktyget ska användas utarbetas inom ramarna för SKB:s ledningssystem.

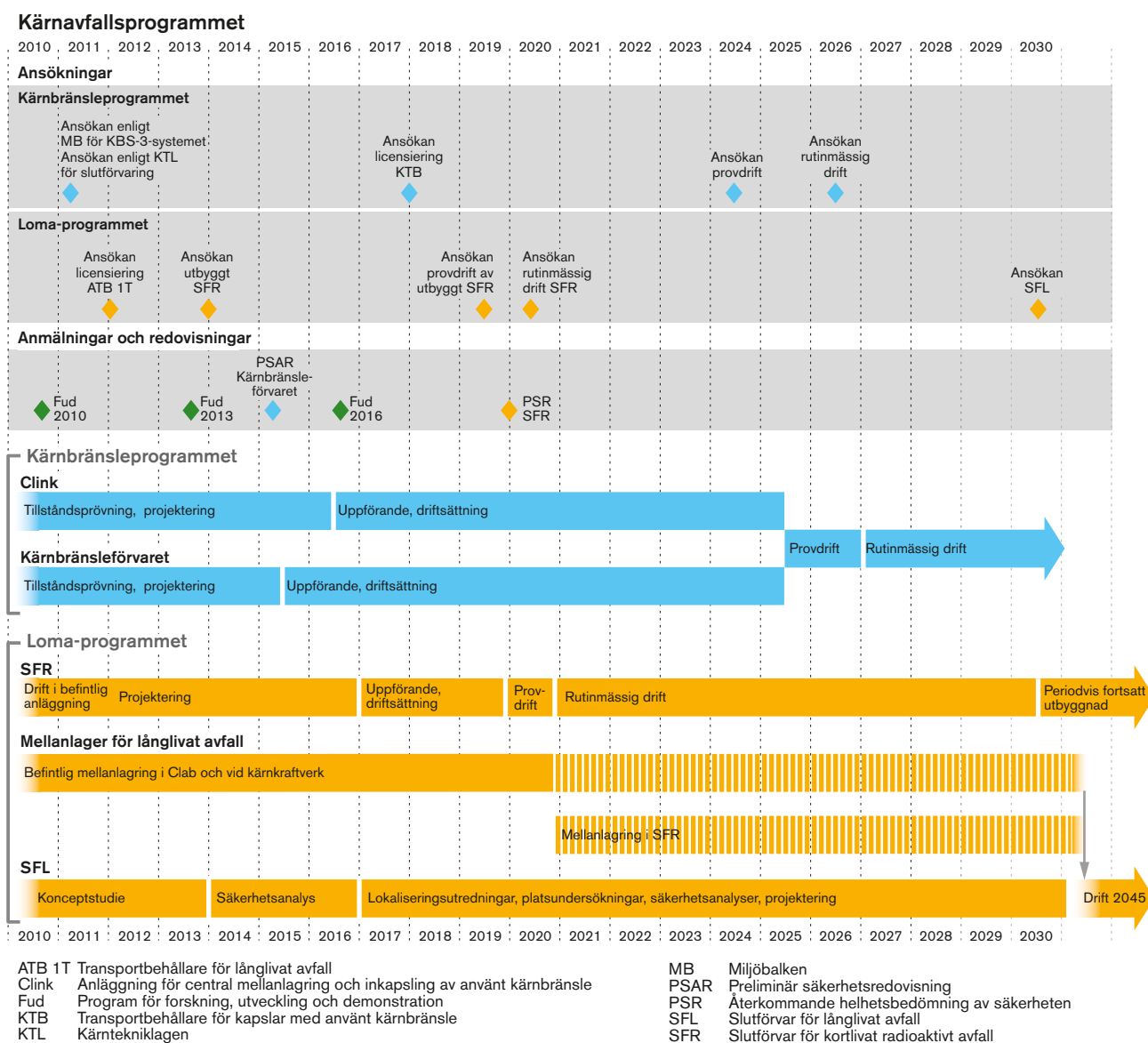
I praktiken återfinns konstruktionsförutsättningarna i olika typer av dokument, exempelvis de som ingår i säkerhetsredovisningen och specifikationer för tillverkning. Dokumenten ger bakgrund och motiv till konstruktionsförutsättningarna medan systemet för kravhantering håller reda på beroenden mellan förvarets olika delar och gör utvecklingen av systemet spårbar. I systemet ska även framgå hur överensstämmelsen med konstruktionsförutsättningarna ska verifieras.

2 Övergripande handlingsplan

Detta kapitel ger en översiktlig bild av SKB:s planering för att uppföra och ta i drift nya anläggningar och anläggningsdelar vid befintliga anläggningar. Mer detaljerade handlingsplaner för Loma-programmet respektive Kärnbränsleprogrammet redovisas i del II och del III. Planeringen för analyser av förvarens långsiktiga säkerhet och den vetenskapliga forskningen för båda programmen redovisas i del IV. Planeringen för den samhällsvetenskapliga forskningen redovisas i del V.

2.1 Huvudtidsplan

Figur 2-1 visar den övergripande tidsplanen för hela kärnavfallsprogrammet. Planen redovisar översiktligt de åtgärder som behövs för att genomföra programmet samt när SKB planerar att lämna in ansökningar och andra lagstadgade redovisningar såsom återkommande säkerhetsredovisningar.



Figur 2-1. SKB:s huvudtidsplan för genomförande av Loma- och Kärnbränsleprogrammen.

I de följande avsnitten redovisas den övergripande planeringen för Loma- respektive Kärnbränsleprogrammen.

2.2 Loma-programmet

2.2.1 Nuläge

Nuläget i Loma-programmet kan sammanfattas i följande punkter:

- Förprojektering och platsundersökningar pågår för utbyggnaden av SFR. Platsundersökningarna inklusive efterföljande analysarbete kommer att avslutas under första halvåret 2011.
- Studie pågår för att utreda konsekvenserna av en mellanlagring av långlivat avfall i utbyggnaden av SFR.
- SKB genomför tillsammans med kärnkraftsföretagen blockspecifika rivningsstudier. Studierna ska bland annat ge bättre uppskattningar av de avfallsmängder som uppkommer vid rivningen.
- SKB har genomfört en förstudie för att utreda alternativet att slutförvara mycket lågaktivt rivningsavfall i markförvar. Studien kommer att uppdateras utifrån resultaten av rivningsstudierna.

2.2.2 Planering

Kortlivat avfall

SKB planerar att bygga ut SFR för att kunna slutförvara det kortlivade rivningsavfallet och den ökade mängden kortlivat driftavfall som är resultatet av planerade längre drifttider av kärnkraftverken. Vid dimensioneringen tar vi även hänsyn till avfall från SVAFO och Studsvik, vilket inkluderar avfall från sjukhus, forskning och industri.

SKB planerar att bygga ut SFR i etapper för att bibehålla flexibilitet avseende erforderlig förvaringsvolym. Ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken planerar vi att lämna in i slutet av år 2013 och kommer att omfatta såväl den befintliga anläggningen som den kompletta utbyggnaden. I samband med ansökningarna om utbyggnad kommer SKB att ansöka om att förvara både drift- och rivningsavfall i hela anläggningen. Drifttillståndet i dag omfattar endast driftavfall.

Enligt planerna kan utbyggnaden av den första etappen påbörjas i början av år 2017 och tas i rutinmässig drift i slutet av år 2020. Den rutinmässiga driften föregås av cirka ett års provdrift. Både provdrift och rutinmässig drift kräver tillstånd av SSM. SFR kommer därefter att byggas ut successivt.

SKB överväger möjligheten att slutförvara mycket lågaktivt avfall från rivningen av kärnkraftverken i markförvar. En förstudie för att undersöka möjligheterna till och konsekvenserna av detta har avslutats. Studien kommer att uppdateras under 2011 med de resultat som kommer fram i de pågående rivningsstudierna. Därefter kommer ett inriktningsbeslut att kunna fattas gemensamt av kärnkraftsföretagen och SKB.

Långlivat avfall

Det långlivade avfallet som uppkommer under driften och rivningen av kärnkraftverken och övriga kärntekniska anläggningar, kommer enligt planerna att slutförvaras i SFL. Innan SFL har driftsatts måste det långlivade avfallet mellanlagras. I dag mellanlagras långlivat avfall vid kärnkraftverken, i Clab och i anläggningar i Studsvik. SKB undersöker för närvarande möjligheten att anordna ett mellanlager i den kommande utbyggnaden av SFR. Om långlivat avfall ska mellanlagras i SFR kommer anökan om mellanlagring att ske i samband med ansökan om utbyggnad.

Det finns i dag långlivat driftavfall vid Barsebäcksverket. Detta avfall kommer att tas ur anläggningen och föras till ett mellanlager innan rivningen av kärnkraftverket påbörjas. Enligt planerna kommer styrstavarna att föras till Clab medan Barsebäck Kraft AB undersöker olika alternativ till mellanlagring för det resterande långlivade driftavfallet. Möjliga alternativ skulle kunna vara Clab, BFA (bergrum för avfall) på Simpevarpshalvön i Oskarshamn eller i ett mellanlager på Barsebäcks anläggningsområde. Om en framtida mellanlagring av långlivat avfall i SFR blir verklighet kan detta och annat avfall som lagras på kärnkraftsområdena på sikt föras över till SFR.

SKB tar fram en ny behållare, benämnd ATB 1T, för att transportera långlivat avfall. Behållaren kommer att licensieras av franska myndigheter. Licensen ska därefter valideras av SSM.

Mellanlagring av styrstavar sker i dag i bassängerna i Clab. SKB överväger att i stället mellanlagra dessa torrt. Ett projekt för att undersöka denna möjlighet kommer att starta inom den kommande treårsperioden. Syftet är att frigöra förvaringsutrymme i Clab för det använda bränslet.

Enligt nuvarande planer kommer vi att kunna lämna in våra ansökningar för SFL cirka år 2030. Innan dess är det många milstolpar som måste passeras. De viktigaste är val av förvarskoncept och plats samt undersökningar och utvärdering av förvarets säkerhet såväl långsiktigt som under drift. Tiden från ansökningar till att ta förvaret i drift är mer osäker eftersom den omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid. I nuläget bedömer vi att SFL kan tas i drift cirka år 2045.

Även om drifttagningen av SFL ligger långt fram i tiden behöver utvecklingsarbetet påbörjas. Arbetet med att ta fram en förstudie av möjliga förvarskoncept har påbörjats. Det valda konceptet kommer sedan att vidareutvecklas och ligga till grund för den analys av den långsiktiga säkerheten som SKB planerar kunna slutföra i slutet av år 2016. Förvarets lokalisering är fortfarande en öppen fråga. Parallellt med arbetet att utveckla förvarskonceptet kommer platsvalsprocessen att pågå. SKB planerar att kunna påbörja platsundersökningarna år 2020. Undersökningarna kommer att pågå under cirka sex år. Innan ansökningar för SFL kan lämnas in så ska anläggningen även förprojekteras.

2.3 Kärnbränsleprogrammet

Programmet för att realisera inkapslingsanläggningen och slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle benämns Kärnbränsleprogrammet.

2.3.1 Nuläge

Nuläget i Kärnbränsleprogrammet kan sammanfattas i följande punkter:

- Platsundersökningarna har avslutats.
- Under år 2009 valde SKB Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle.
- Ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet kommer att lämnas in i början av 2011.
- Projekten Kärnbränsleförvaret och Inkapslingsanläggning har initierats. Projektens huvudmål är att projektera, bygga, bemanna och driftsätta respektive anläggning.
- Inom projekt Kärnbränsleförvaret pågår inledande projektering samt platsaktiviteter såsom etablering av platskontor och fortsatta geovetenskapliga undersökningar.
- Inom projekt Inkapslingsanläggning pågår förberedelser för att genomföra system- och detaljkonstruktion.

2.3.2 Planering

SKB har nu kommit så långt i utvecklingen av KBS-3-systemet för slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet och analyserna av den långsiktiga säkerheten, att vi kan visa att systemet har goda förutsättningar att uppfylla ställda krav. Inom kort kommer SKB att lämna in en ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvarsanläggningen och en ansökan enligt miljöbalken för KBS-3-systemet. Den miljökonsekvensbeskrivning som biläggs båda ansökningarna, ersätter den som lämnades in år 2006 med ansökan för inkapslingsanläggningen enligt kärntekniklagen.

Nu när ansökningarna är nära förestående anser SKB att planeringen för byggande och drift av anläggningarna för inkapsling och slutförvaring övergått från att vara en utvecklingsfråga till att bli en tillståndsfråga. Genomförandeplanen bör därmed hanteras inom tillståndsprocessen. Utvecklingen av den teknik som behövs för de båda anläggningarna kommer däremot att även fortsättningsvis hanteras inom Fud-processen. Nedan ges en översikt av planeringen i syfte att ge en helhetsbild av Kärnbränsleprogrammet.

Kärnbränsleprogrammets tidsplan efter att ansökningarna lämnats in kan delas upp i följande faser: en inledande projekterings- och tillståndsperiod, därefter uppförande och driftsättning följt av drift med deponering av använt kärnbränsle.

Nuvarande planering för Kärnbränsleprogrammet bygger på bedömningen att det kommer att krävas cirka fem år för tillståndsprovningen. Innan byggandet av Kärnbränsleförvaret får påbörjas ska även en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) lämnas in och godkännas av SSM. SKB planerar därför att kunna påbörja uppförandet av inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret år 2015. Under perioden fram till byggstart kommer organisationen inom projekten Kärnbränsleförvaret och Inkapslingsanläggning att byggas upp successivt. Under perioden genomförs en system- och detaljkonstruktion för de båda anläggningarna. Dessutom ska upphandlingar genomföras.

Uppförandet av anläggningarna övergår successivt i driftsättning allteftersom delsystemen färdigställs och kan provas. Provningsen avslutas med en samfunktionsprovning av anläggningarna var för sig och slutligen av hela KBS-3-systemet. Inkapslingsanläggningen kommer att kopplas samman med Clab. Därefter genomförs samfunktionsprovning av den integrerade anläggningen, Clink. Innan provdrift av Clink och Kärnbränsleförvaret får påbörjas kommer säkerhetsredovisningarna för respektive anläggning att förnyas så att de avspeglar anläggningarna såsom de är byggda. Provdriften inleds när tillstånd erhållits från SSM och pågår fram till dess att den rutinmässiga driften får inledas. SKB uppskattar att provdriften vid Kärnbränsleförvaret och Clink kan påbörjas år 2025.

Innan transporter av inkapslat använt kärnbränsle, och därmed provdriften, påbörjas kommer SKB att ta fram och licensiera en ny behållare för transporten från Clink till Kärnbränsleförvaret, benämnd KTB.

Utifrån de erfarenheter som fås under provdriften kompletteras säkerhetsredovisningarna och de säkerhetstekniska driftförutsättningarna. Dessa kommer sedan att ingå som underlag i SKB:s ansökningar om att få påbörja rutinmässig drift av anläggningarna. Den rutinmässiga driften pågår tills förslutningen av slutförvaret kan inledas.

2.3.3 Förslutning och möjlighet till återtag

Kärnbränsleförvaret är utformat så att det är möjligt att ta tillbaka deponerade kapslar under deponeringen. Däremot görs inga särskilda åtgärder för att underlätta ett återtag av kapslarna efter förslutning av förvaret.

Under driftskedet kan enstaka kapslar behöva tas upp ur deponeringshålet om något oförutsett inträffar under deponeringen. SKB har demonstrerat att detta går att genomföra på ett säkert sätt i Äspölaboratoriet. Efter att Kärnbränsleförvaret förslutits ökar arbetsinsatsen ytterligare för att genomföra ett återtag eftersom avsevärda mängder återfyllning och tunnelpluggar måste avlägsnas.

I Sverige finns inget formellt krav på att det ska vara möjligt att återta deponerade kapslar efter förslutningen av Kärnbränsleförvaret. Det är heller inte avsikten med KBS-3-metoden att kapslar som deponerats ska återtas men förvarets konstruktion medför att om framtida generationer skulle vilja ta upp bränslet är detta resurskrävande men fullt möjligt.

Kärnbränsleförvaret är så utformat att dess säkerhet inte är beroende av en övervakning efter förslutningen. I och med att förvaret förslutits har SKB uppfyllt lagstiftningens krav på säker slutförvaring av det använda kärnbränslet. Frågan om sistaansvaret för slutförvaringen, det vill säga det långsiktiga ansvaret för det förslutna slutförvaret för använt kärnbränsle, bereds för närvarande i Utredningen om en samordnad reglering på kärnteknik- och strålskyddsområdet. Utredaren har i uppdrag att överväga behovet och den eventuella utformningen av en lagreglering av det långsiktiga ansvaret för det förslutna slutförvaret för använt kärnbränsle.

3 Flexibilitet vid ändrade förutsättningar

Genomförandet av Loma- och Kärnbränsleprogrammen planeras utifrån de strategiska utgångspunkter som i dag bedöms vara de mest realistiska. Den aktuella tidshorisonten är cirka 75 år, varför vi måste räkna med att det med tiden uppstår ändringar av planeringsförutsättningarna och att det kan göras omvärderingar av de nuvarande utgångspunkterna för planeringen. Framdriften av såväl Loma-programmet som Kärnbränsleprogrammet är dessutom beroende av externa beslut, vilket innebär att det inte alltid är möjligt för SKB att fullt ut hantera och kontrollera villkoren för programmets genomförande.

Det kommer således att ställas stora krav på anpassningar till ändringar av förutsättningarna för programmen. Ofta är det möjligt att beakta sådana ändringar genom smärre modifieringar av programmen utan större ändringar av den långsiktiga tidsplanen. Men det finns givetvis alltid en gräns när ändringarna blir så omfattande att de ställer krav på påtagliga och omfattande åtgärder, exempelvis krav på ytterligare anläggningar eller anläggningsdelar, ändringar av layouten för ett slutförvar, kortare eller längre provningstider än tidigare beräknade, och så vidare.

Verksamheten medger en förhållandevis stor flexibilitet med avseende på ändrade förutsättningar. Nedan redovisas mycket översiktligt programmets flexibilitet och begränsningar vid ett antal specifika ändringar av förutsättningarna.

3.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

SKB:s planering baseras på 50 års drift av reaktorerna i Forsmark och Ringhals och 60 års drift av reaktorerna i Oskarshamn. Eventuella förändringar av dessa antagna drifttider innebär ändrade planeringsförutsättningar för Loma- och Kärnbränsleprogrammen.

En förlängning av reaktorernas beräknade drifttider innebär en ökad mängd av såväl driftavfall som använt kärnbränsle, och leder därför till krav på en ökad kapacitet av förvarssystemen. Förlängda drifttider innebär också att SKB:s anläggningar utnyttjas under längre tid.

För Kärnbränsleprogrammet motsvarar nuvarande planeringsförutsättningar slutdeponering av cirka 6 000 kapslar, med en deponeringstakt på cirka 150 kapslar per år. En förlängd drifttid med ett år för en reaktor innebär att ytterligare 10–30 ton använt kärnbränsle ska mellanlagras och att ytterligare 5–15 kapslar ska slutförvaras (volymen beror bland annat på reaktorns storlek och drifttid under året). Behovet av mellanlagring för tillkommande använt bränsle uppkommer efter utgången av den nu planerade drifttiden om 50 eller 60 år, och då beräknas en utlastning ha skett från Clab så att utrymme finns för detta bränsle. Dagens planerade slutförvarskapacitet bedöms kunna ökas genom ett bättre utnyttjande av deponeringsytorna och genom att outnyttjade områden på det valda förvarsdjupet tas i anspråk. Det är inte heller uteslutet att bergvolymen utanför de som nu beräknas att kunna användas, kan vara lämpliga för deponering.

En förlängd drifttid innebär också ett större behov av att slutförvara kortlivat driftavfall. För närvarande pågår planeringen av en etappvis utbyggnad av SFR. Dimensioneringen bygger på gällande driftplaner för kärnkraftsreaktorerna, men med ett visst osäkerhetsintervall som bland annat skulle kunna utnyttjas för ett ökat behov av förvarsutrymme. Skulle de förlängda drifttiderna bli av större omfattning, och därmed ge upphov till ett ytterligare ökat utrymmesbehov vid SFR, kan detta sannolikt tillhandahållas genom ytterligare utbyggnad av förvarsområdet.

En förlängd drifttid leder vidare till att den tidpunkt när reaktorn ställs av och rivningen kan inledas skjuts framåt i tiden. Om drifttiden för en enstaka reaktor förlängs betyder det att behovet av deponering av rivningsavfall förskjuts för just denna reaktor, medan planeringen i övrigt förblir oförändrad. Om reaktorernas drifttider förlängs överlag följer en allmän tidsförskjutning av rivningar och behovet av förvaringsutrymme för rivningsavfallet. Detta medför i sin tur en senareläggning av slutförvarens förslutningar. Detta skulle komma att gälla Kärnbränsleförvaret, slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) samt slutförvaret för långlivat radioaktivt avfall (SFL).

Enligt SKB:s planer kommer SFL tas i drift cirka år 2045. I arbetet med SFL finns möjlighet att ta hänsyn till förändrade förutsättningar eftersom det omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid.

Omvänt skulle en förkortning av de beräknade drifttiderna för vissa reaktorer i stället innebära en minskad produktion av driftavfall och använt kärnbränsle, och därför leda till ett minskat utrymmesbehov i förvarssystemen. Alla anläggningar för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle kommer dock att behövas. I Kärnbränsleförvaret kan då antalet deponeringspositioner minska. Om SFR redan har byggts ut till full omfattning enligt dagens prognostiserade volymer, kommer en förkortad drifttid av kärnkraftsreaktorerna sannolikt att innebära att anläggningen inte kommer att utnyttjas fullt ut.

En förkortad drifttid innebär vidare att det totala kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Om reaktorernas drifttider skulle kortas överlag följer en allmän tidigareläggning av rivningar och deponering av rivningsavfall. SFR kan då förslutas tidigare än enligt nu aktuella planer. Tidsförskjutningarnas omfattning beror på hur många reaktorer som berörs, och hur långa neddragningarna av drifttiderna blir.

De driftscenarier som ligger till grund för planeringen inbegriper också antaganden avseende det framtida effektuttaget i reaktorerna, bränslets utbränningsgrad samt framtida moderniseringar av kärnkraftverken. SKB:s aktuella planer bygger på de ändringar som nu planeras av kärnkraftsföretagen. Detta innebär ett ökat framtida deponeringsbehov, som nu arbetats in i aktuella planer. Underlag för framtida planering hämtas varje år in från kärnkraftsföretagen. Eventuella ytterligare effekthöjningar kan leda till ett ökat deponeringsbehov.

3.2 Nya kärnkraftsreaktorer

Med en möjlighet till generationsskiften i kärnkraftsbeståndet kan dagens driftscenario komma att ändras avsevärt. Den totala volymen avfall kan bli betydligt större än vad som förutsatts. Det är i dag inte möjligt att prognostisera omfattningen av de avfallsvolymer som skulle aktualiseras genom generationsskiften. De beror framför allt på hur framtida ekonomiska avvägningar kan påverka viljan att investera i ny kärnkraft. Byggandet av en ny reaktor kan få en liknande effekt på planeringen som ovan redovisats för förlängda drifttider. En ersättning av dagens reaktorer med flera nya reaktorer torde snarare medföra behov av ett helt nytt kärnavfallsprogram, eventuellt med ett delvis nytt kärnavfallssystem.

Dagens tio reaktorer beräknas enligt nuvarande planering att tas ur drift under perioden 2025–2045. Om då nya reaktorer i stället fasas in innebär det nya scenariot en drifttid för kärnkraften på sammanlagt upp till 130 år, om de nya reaktorerna utnyttjas under 60 år.

De nya reaktorerna antas tillhöra vad som brukar kallas tredje generationens kärnreaktorer. De är i många avseenden annorlunda och mer tekniskt utvecklade än dagens reaktorer. Det är dock fråga om kok- eller tryckvattenreaktorer med samma grundläggande teknik som dagens reaktorer och de ger därmed samma slag av restprodukter som dessa. Den relativa sammansättningen av avfallet kan bli en annan än dagens. Innehållet av radioaktiva ämnen i det använda kärnbränslet beror till exempel på vilken typ av bränsle som används, driftförhållandena och bränslets avklingningstid. Sammansättningen och fördelningen mellan de kort- och långlivade ämnena styrs av utbränningsgraden och den så kallade specifika effekten.

Volymen radioaktivt driftavfall torde bli lägre per producerad kilowattimme el än vad den första och andra generationens reaktorer lämnat efter sig. Utvecklingen har redan i dag lett till att den mängd driftavfall som tas om hand från de svenska reaktorerna är avsevärt mindre i förhållande till elproduktionen, än vad man räknade med när reaktorerna togs i drift. Anledningen är att avfallet bearbetas och kompakteras i syfte att kräva mindre utrymme.

I princip bör det avfallssystem som nu är under uppbyggnad till större delen också kunna användas för tillkommande kärnavfall och använt kärnbränsle från de nya reaktorerna. Många av systemets anläggningar måste genomgå omfattande renoveringar under den långa drifttid som antas, och slutförvaren för använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall måste byggas ut.

Det använda kärnbränslet från de nya reaktorerna förutsätts komma att mellanlagras under cirka 30 år innan det inkapslas och förs till Kärnbränsleförvaret. Detta innebär att det befintliga mellanlagret Clab kommer att användas under en period som sträcker sig in på 2100-talet. Under förutsättning att deponeringen av det använda kärnbränslet kan påbörjas under 2020-talet som planeras, och därefter kan fortgå med cirka 150 kapslar per år, kommer Clab att också kunna utnyttjas för det använda bränslet från de nya reaktorerna. Givetvis måste Clab under denna långa tid undergå omfattande renoveringar (som nu genomförs med bassängerna i Clabs första bergtrum), men den ursprungliga grundinvesteringen i mellanlagret bör kunna utnyttjas även i fortsättningen. Detsamma gäller inkapslingsanläggningen som ju planeras bli sammanbyggd med Clab. Även den planerade kapsel fabriken bör kunna drivas vidare utan större förändringar.

Nedan redovisas två exempel på hur generationsskiftet av svenska reaktorer skulle kunna se ut och påverka SKB:s anläggningar i framtiden.

I det första exemplet antas ersättningsreaktorernas nettoeffekt vara densamma som dagens reaktorer. För detta behövs ett förvaransområde av samma storleksordning som det som planeras för det använda kärnbränslet från dagens reaktorer. Det torde då vara både säkerhetsmässigt och ekonomiskt mest fördelaktigt att förlägga de nya förvaransområdena i anslutning till Kärnbränsleförvaret i Forsmark. Fördelarna ligger dels i goda kunskaper om berggrunden runt förvaret, varför behovet av nya undersökningar kan reduceras, dels i att ovanmarksanläggningar, ramp och schakt kan användas också för det tillkommande förvaransområdet. För att möta det ökade deponeringsbehovet kan SKB utreda och undersöka möjligheten att bygga ett plan till i Kärnbränsleförvaret. Detta möjliggör att det övre planet kan förslutas efter den första generationens kärnkraftverk, medan driften av det undre planet tar vid.

Vidare innebär detta scenario ett tillkommande behov av förvarskapacitet för driftavfall av i det närmaste samma omfattning som SFR med nu planerad utbyggnad. Utbyggnad av de med tiden tillkommande ytterligare slutförvarsutrymmena kan ske i anslutning till SFR, om berggrunden kan anses lämplig, eller som en separat anläggning på annan plats.

Behov kommer också att uppkomma av en ytterligare utbyggnad av slutförvaret för långlivat avfall, SFL. Byggandet av SFL skulle behöva påbörjas i stort sett enligt nu gällande planer för att ta hand om avfall från dagens reaktorer.

I det andra exemplet antas att dagens reaktorer ersätts med nya reaktorer som har en väsentligt större samlad nettoeffekt. Det skulle möjliggöra en större elproduktion, men medför också en produktion av mer radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Om dagens avfallsanläggningar skulle utnyttjas kommer det att krävas utbyggnader. Exempelvis skulle det förmodligen behövas en större lagringskapacitet i Clab och med tiden en ökad kapacitet i inkapslingsanläggningen. Givetvis krävs också förvaransområden i större omfattning än vad som nu planeras. Det är möjligt att dessa kan anläggas i anslutning till det nu planerade Kärnbränsleförvaret, men det krävs fortsatta undersökningar för att avgöra detta. Alternativet är att ta en ny slutförvarsanläggning i bruk.

Generellt pekar detta på att ett expanderat driftscenario, med en större elproduktionskapacitet än dagens, skulle motivera mer påtagliga ändringar av dagens avfallssystem än ett mer begränsat scenario. Exempelvis kan en nybyggnad av en anläggning ersätta en utbyggnad, i det fall underhållet av den äldre anläggningen kan antas bli kostsamt med tiden. För att avgöra detta krävs ingående avvägningar med god kunskap om de nya planeringsförutsättningarna.

3.3 Drifftagning av Kärnbränsleförvaret och Clink

SKB planerar för att kunna inleda provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink år 2025. I dag har Clab tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle (räknat som mängd uran). Enligt dagens prognoser beräknas detta uppnås cirka år 2023. Det betyder att SKB behöver vidta åtgärder för att öka Clabs tillåtna lagringskapacitet. Ungefär samtidigt kommer alla lagringspositionerna att vara fyllda. Åtgärder krävs därför även för att utnyttja befintligt lagringsutrymme effektivare.

I Clab används två typer av lagringskassetter för bränsle, normal- och kompaktkassetter. En övergång till att enbart använda kompaktkassetter skulle innebära att den fysiska lagringskapaciteten i Clab utökas och att tidpunkten då Clab är fullt förskjuts till cirka år 2029.

Förutom använt kärnbränsle lagras i Clab även långlivat kärnavfall i form av hårdkomponenter och styrstavar. Styrstavarna från tryckvattenreaktorerna är integrerade i bränslet medan styrstavarna från kokvattenreaktorerna lagras i kassetter som rymmer nio styrstavar. Under slutet av 90-talet utredde SKB möjligheten att kompaktera BWR-styrstavarna. En sådan åtgärd skulle kunna halvera utrymmesbehovet, vilket innebär att tidpunkten då Clab blir fullt kan fördröjas med två år. Om styrstavarna kompakteras och allt använt bränsle lagras i kompaktkassetter kommer Clab att vara fullt cirka år 2031.

Ett annat alternativ skulle kunna vara att hitta andra lösningar för mellanlagring av hårdkomponenterna och styrstavarna. Inom den kommande treårsperioden planerar SKB att starta ett projekt som syftar till att undersöka detta. En lösning skulle kunna vara att övergå till torr mellanlagring. Om en alternativ lösning för mellanlagring av samtliga hårdkomponenter och styrstavar kan hittas och om enbart kompaktkassetter används för det använda kärnbränslet kommer alla lagringspositioner i Clab att vara fyllda år 2037.

Om det skulle visa sig nödvändigt, finns även möjligheten att bygga ut Clab med ett tredje berg- rum med lagringsbassänger. Detta skulle dock först bli aktuellt vid en mycket stor försening av Kärnbränsleprogrammet. En utbyggnad skulle sannolikt ske på liknande sätt som utbyggnaden av Clab etapp 2, som togs i drift år 2008. Om Clab utökas med ett tredje berg- rum skulle anläggningen kunna ta emot bränsle i ytterligare 20 till 25 år.

3.4 Drifttagning av det utbyggda SFR

Utbyggnaden av SFR planeras så att rivningsavfall från Barsebäck, Ågesta och Studsvik kan börja deponeras år 2020. För att nå detta mål planerar SKB att lämna in ansökningar i slutet av år 2013. Utbyggnaden planeras att kunna påbörjas i början av år 2017.

Den i dag tillgängliga förvarsvolymen i SFR är inte tillräckligt stor för att rymma det kortlivade avfallet från rivningen av Barsebäck, utan att det skulle leda till utrymmesbrist för driftavfallet. SKB har redovisat detta i kompletteringen av Fud-program 2007. SSM har i sina kommentarer avseende kompletteringen angett att det underlag SKB redovisat är tillräckligt underbyggt och godtagbart för att ligga till grund för den fortsatta planeringen.

En eventuell försening av drifttagningen av det utbyggda SFR skulle innebära att rivningen av Barsebäck och Ågesta blir försenad i motsvarande grad. Det finns dock inga negativa radiologiska konsekvenser vid en eventuell försening.

Även deponeringen av driftavfall kan komma att påverkas vid en försening av utbyggnaden av SFR. Den förvarsdelen som först förväntas bli fullt utnyttjad är BLA (berg- rum för lågaktivt avfall). Vid en eventuell försening kan det lågaktiva driftavfallet behöva mellanlagras, till exempel på kraftverksområdena. Marginalerna för övriga förvarsdelen är relativt stora.

Del II

Loma-programmet

- 4 Handlingsplan för genomförande
- 5 Hantering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall
- 6 Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall
- 7 Ansvar, planering och teknik för avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar

4 Handlingsplan för genomförande

I denna del av Fud-programmet redovisas planeringen för Loma-programmet, det vill säga programmet för omhändertagande av det låg- och medelaktiva avfallet inklusive planering och teknik för avveckling av kärntekniska anläggningar. Även hanteringen av mycket lågaktivt avfall beskrivs i det fall denna påverkar Loma-programmets planer. I kapitel 4 presenteras planeringen översiktligt. Slutsatserna från handlingsplanen i Fud-program 2007 rekapituleras kort, liksom myndigheternas granskningskommentarer samt slutsatser från och granskningskommentarer på kompletteringen av Fud 2007. Vidare ges en översiktlig tidsplan för Loma-programmet. Utifrån tidsplanen redovisas där- efter övergripande planering med milstolpar. I kapitlen 5 till 7 presenteras mer detaljerade planer och program för hantering av kortlivat respektive långlivat låg- och medelaktivt avfall samt avveckling av kärntekniska anläggningar. Den naturvetenskapliga forskning som bedrivs inom ramarna för Loma-programmet beskrivs i del IV.

Slutsatser i Fud 2007, komplettering av Fud 2007 samt granskningen av dessa

I kompletteringen av Fud 2007 redovisades det planerade svenska systemet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall och en översiktlig tidsplan för Loma-programmets hela livslängd där kopplingen till framtida rivning av kärnkraftsreaktorerna illustrerades. Där beskrevs även den övergripande planeringen för mellanlagring och slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall, inklusive avveckling av anläggningarna. Viktiga milstolpar för Loma-programmet under det kommande årtiondet angavs, såsom ansökningar, anmälningar, platsundersökningar och platsval.

I kompletteringen av Fud 2007 beskrev SKB att ansökningarna om en utbyggnad av SFR kommer att omfatta hela den tillkommande utbyggnaden, men att planerna inte är definitiva avseende om utbyggnaden ska ske i ett eller två steg. Det utbyggda förvaret planeras att vara driftsatt år 2020. SKB nämnde även möjligheten att eventuellt slutförvara mycket lågaktivt rivningsavfall i markförvar i stället för i SFR.

Det långlivade avfallet, som uppkommer vid drift, moderniseringar och rivning av kärnkraftverken, planeras att mellanlagras fram till att ett slutförvar för långlivat avfall, SFL, upprättats. I kompletteringen av Fud 2007 omnämndes både det befintliga berggrummet för avfall på Simpevarpshalvön (BFA) och ett framtida berggrum i SFR som möjliga mellanlager.

För SFL diskuterades alternativa tidpunkter för driftsättning och översiktliga motiv till dessa alternativ. SKB avsåg att i Fud-program 2010 ge en bättre uppskattning av avfallsmängder och när i tiden det långlivade avfallet uppstår.

SKB har utöver sitt ansvar för transport, mellanlagring och slutförvaring av kärnkraftverkens radioaktiva avfall, även ett antal avtal eller avsiktsförklaringar med andra aktörer såsom Studsvik och SVAFO som avser omhändertagande och slutförvaring av deras radioaktiva avfall. SKB avser att gå igenom och sammanställa de åtaganden som sedan tidigare finns samt att uppdatera dem, om så bedöms vara behövligt.

SSM noterar att SKB diskuterar möjligheten att bygga ut SFR i ett eller två steg. SSM förväntar sig en något mer fördjupad analys av de olika alternativen i redovisningen i Fud-program 2010. SSM förväntar sig en tydligare redogörelse för den flexibilitet som en utbyggnad i två steg tillåter, med tanke på att referensscenariot för avveckling och rivning av kärnkraftverken kan komma att förändras i framtiden. SSM förväntar sig att resonemanget kring olika handlingsalternativ för hantering och slutförvaring av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utvecklas i Fud-program 2010. Enligt SSM:s uppfattning är det underlag som SKB hittills redovisat som grund för att vänta med färdigställandet av SFL till år 2045, inte tillräckligt underbyggt. Anledningen till SSM:s skepsis är att en betydande andel av avfallet redan finns eller kommer att produceras innan år 2045.

4.1 Loma-programmet

Loma-programmet syftar till att omhänderta det låg- och medelaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken på ett säkert sätt samt att hålla samman planerings- och teknikfrågor för avveckling. Även om Loma-programmet främst syftar till att omhänderta låg- och medelaktivt avfall, innefattar programmet även frågor kopplade till det mycket lågaktiva avfallet. Det mycket lågaktiva avfallet hanteras i dag till största delen av kärnkraftsföretagen. Det radioaktiva avfall som hanteras inom Loma-programmet definieras i avsnitt 1.1.3. En beskrivning av det svenska systemet för omhändertagande av avfall och de anläggningar som finns och planeras för att hantera låg- och medelaktivt avfall finns i avsnitt 1.2.2.

4.2 Planering

Figur 4-1 visar den övergripande tidsplanen och milstolparna för Loma-programmet. De streckade staplarna markerar såväl osäkerheter som flexibilitet i planeringen. Den mer detaljerade planeringen sträcker sig över en tidsperiod av cirka tio år och redovisas i kapitlen 5 till 7.

Milstolparna i figur 4-1 är indelade i två kategorier, ansökningar, anmälningar och lagstadgade redovisningar samt viktiga milstolpar för uppförande och driftsättning av planerade anläggningar.

För att illustrera kopplingen mellan Loma-programmets och kärnkraftsföretagens planer syns i figuren även kärnkraftsföretagens aktuella planering för rivningen av reaktorerna. SKB:s och kärnkraftsföretagens planering utgår från att reaktorerna i Forsmark och Ringhals drivs i 50 år och att reaktorerna i Oskarshamn drivs i 60 år. Rivning av ett block påbörjas inte förrän intilliggande block med gemensamma byggnader och system är avställda. Rivning kan tidigast påbörjas cirka två år efter att ett block slutligen ställts av och rivningen av aktiva delar bedöms ta fem år.

I följande avsnitt redovisas SKB:s övergripande planering för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall.

4.2.1 Planering för kortlivat drift- och rivningsavfall

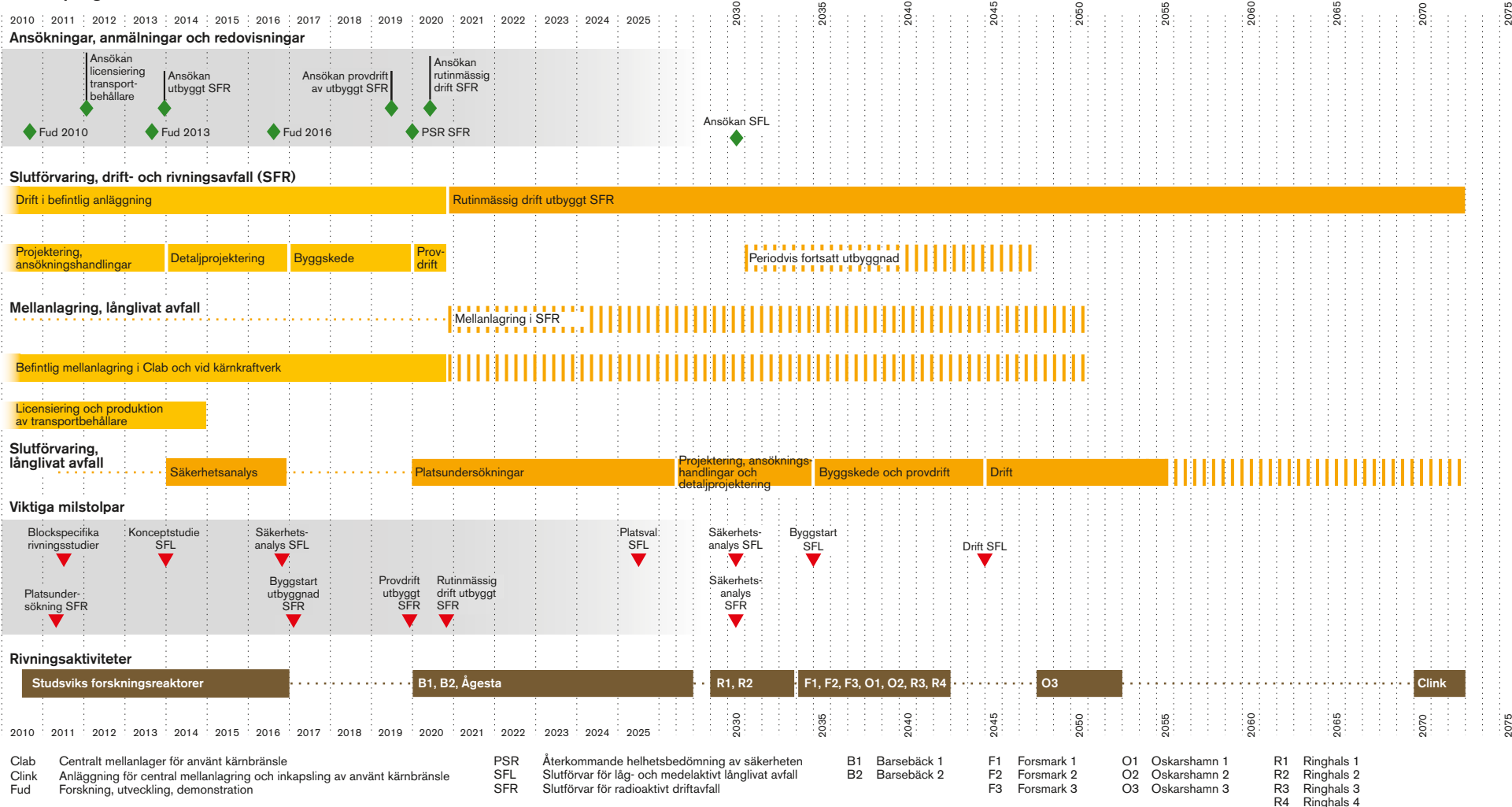
SKB planerar för att ta hand om radioaktivt avfall som uppstår vid drift och rivning av de svenska kärnkraftverken inklusive reaktorn i Ägesta och forskningsreaktorerna i Studsvik samt avfall från SKB:s egen verksamhet. Därutöver planerar SKB för att ta hand om kortlivat radioaktivt avfall från sjukvård, forskning och industri. En förutsättning för att detta avfall ska kunna deponeras i SFR är att avfallet konditioneras och förpackas på lämpligt sätt. I Studsvik finns behandlingsanläggningar där detta görs. SKB har även förbundit sig att omhänderta historiskt avfall från SVAFO.

SKB planerar att bygga ut SFR och utbyggnaden dimensioneras för att kunna omhänderta kortlivat låg- och medelaktivt driftavfall som tillkommer på grund av längre planerade drifttider av kärnkraftverken samt kortlivat rivningsavfall. Dessutom planerar vi för att kunna mellanlagra långlivat avfall från kärnkraftverken i SFR.

Utbyggnaden av SFR planerar vi att genomföra i etapper så att utrymme alltid finns tillgängligt för rivningsavfall från kärnkraftverken i enlighet med kärnkraftsföretagens avvecklingsplanering. SKB bedömer att det finns tillräckliga tidsmarginaler, från tidpunkten för avställning av en reaktor till dess att rivningsavfall levereras för deponering, för att det ska vara möjligt att bygga ut SFR med motsvarande förvarsvolym. Denna bedömning förutsätter att ingen ytterligare tillståndsprovning erfordras, än den som nu planeras.

Fördelen med en etappvis utbyggnad är att risken för att förvaret byggs onödigt stort minskar. De uppskattade volymerna avfall som uppkommer vid rivning innehåller osäkerheter och till detta kommer även osäkerheter om de volymer avfall som kan komma att deponeras i markförvar i stället för i SFR. Genom att bygga ut i etapper kan SKB dels få erfarenheter från fler rivningsprojekt och driften av den första etappen samt hinna få en bättre uppskattning av den volym avfall som kan deponeras i markförvar, innan förvaret färdigställs. Innan beslut fattas om etapputbyggnaden, måste bland annat juridiska och ekonomiska aspekter samt konsekvenser på driftverksamheten i SFR utredas.

Loma-programmet



Figur 4-1. Tidsplan för Loma-programmet. Streckade staplar markerar osäkerheter eller flexibilitet i planeringen, till exempel tidpunkten för förslutning av SFR och SFL samt vidare utbyggnad av SFR. Milstolparna kan utfalla någonstans utmed de linjer på vilka de är placerade.

Den första etappen planeras vara i drift år 2020 och dimensioneras för att minst inrymma:

- Ökad mängd driftavfall på grund av större ombyggnader och förlängd planerad drifttid av kärnkraftverken.
- Rivningsavfall från Barsebäck 1 och Barsebäck 2, forskningsreaktorerna i Studsvik, Ågestareaktorn samt Ringhals 1 och Ringhals 2.
- Möjlighet att deponera stora komponenter som till exempel hela reaktortankar.
- Utrymme för mellanlagring av långlivat avfall från kärnkraftverken.

I samband med ansökningarna om att bygga ut SFR planerar SKB att ansöka om att få deponera både drift- och rivningsavfall i hela anläggningen. På så sätt ges bättre förutsättningar att optimera styrningen av avfallsströmmar i SFR. Ansökningarna om utbyggnaden kommer att omfatta befintlig anläggning och hela den tillkommande utbyggda delen. Konsekvenser av mellanlagring av långlivat avfall på den befintliga driftverksamheten och tekniska krav på utrustning kommer att utredas innan vi utformar utbyggnaden av SFR. För att utreda konsekvenser på driftverksamheten kommer bland annat en händelseanalys och riskanalys för hantering av BFA-tankar i SFR att genomföras. Ansökan om mellanlagring av långlivat avfall planeras ske i samband med ansökningarna för utbyggnad.

SKB kommer vidare att ansöka om ett nytt strålskyddsvillkor i anslutning till ansökningarna om utbyggnad av SFR. Strålskyddsvillkoret begränsar den mängd aktivitet och material som får deponeras i SFR och utgår i dag från avfallsprognoser för driftavfall. Det nya strålskyddsvillkoret kommer att omfatta rivningsavfall och utökade mängder driftavfall och baseras på de realistiska avfallsprognoser som värderas i den säkerhetsanalys som görs inför ansökan om utbyggnad av SFR.

Utbyggnaden av SFR dimensioneras preliminärt för att omfatta även mycket lågaktivt rivningsavfall. Detta avfall kan komma att placeras i markförvar i stället för i SFR. SKB har genomfört en förstudie för att belysa tänkbara möjligheter och konsekvenser av att förvara en del av rivningsavfallet i markförvar, men frågan måste utredas vidare innan beslut kan fattas, se avsnitt 5.5. Den volym rivningsavfall som kan bli aktuell att deponera i markförvar kommer att uppskattas utifrån block-specifika rivningsstudier som färdigställs under år 2011. Ett beslut om deponering i markförvar av större volymer lågaktivt rivningsavfall skulle minska den nödvändiga förvarsvolymen i SFR.

SFR planeras att förslutas när Clink har rivits, se figur 4-1.

4.2.2 Planering för långlivat drift- och rivningsavfall

En stor del av det långlivade avfallet från kärnkraftverken uppstår i samband med att dessa rivs, men långlivat avfall uppstår även under driften i samband med att reaktorernas interna delar byts ut. Dessutom har Studsvik och SVAFO långlivat låg- och medelaktivt avfall med ursprung från bland annat industri, forskning och utveckling. En del av detta är äldre avfall från tiden för utvecklingen av det svenska kärnkraftsprogrammet. SVAFO arbetar regelbundet med kompletterande avfalls-karakterisering med syfte att urskilja och sortera avfall som ska slutförvaras i SFL respektive SFR. En översikt av avfallsmängderna och när i tiden det långlivade avfallet uppstår ges i avsnitt 6.1.

Mellanlagring

I dag mellanlagras långlivat låg- och medelaktivt avfall vid kärnkraftverken, i Clab och i anläggningar i Studsvik. Långlivat driftavfall från Barsebäck kan även fortsättningsvis komma att mellanlagras på Clab men möjligheten undersöks att mellanlagra avfallet i BFA eller på Barsebäcks anläggningsområde.

I det pågående projektet för utbyggnaden av SFR utreds om det är tekniskt genomförbart samt ekonomiskt och strålskyddsmässigt försvarbart att etablera ett mellanlager för långlivat avfall i det utbyggda SFR. Beslut om mellanlagring i SFR kommer att fattas innan utbyggnadens utformning fastslås. SKB:s plan är att mellanlagra långlivat avfall i SFR och på sikt överföra det långlivade avfall, som nu mellanlagras på kärnkraftverksområdena till det utbyggda SFR.

En ny avfallstransportbehållare, benämnd ATB 1T, ska tas fram för att transportera det långlivade låg- och medelaktiva avfallet. Leverans av avfallstransportbehållaren väntas år 2015. Utrustning för hantering av avfallet på kärnkraftverken togs i drift på kärnkraftverket i Forsmark under våren 2010. Dessutom avser SKB att licensiera om en befintlig transportbehållare (ATB 8K) för att kunna transportera restavfall från till exempel sönderdelning av det långlivade avfallet.

Mellanlagring av styrtavar sker i dag i Clab. Inom den kommande treårsperioden kommer vi att undersöka olika alternativ för mellanlagring av styrtavar. Syftet är att utreda om vi kan öka mellanlagringskapaciteten för bränsle i Clab.

Slutförvar

SKB planerar att ansöka om att få bygga ett slutförvar för långlivat avfall cirka år 2030 och att kunna ta det i drift cirka år 2045.

Innan vi kan lämna in ansökan är det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom val av förvarskoncept och plats, undersökningar, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar etc. Att lämna in ansökan cirka 2030 bedömer vi vara realistiskt under förutsättning att vi kan förlägga förvaret på en plats som SKB tidigare har god kännedom om. Tiden från ansökningar till att ta förvaret i drift är mer osäker eftersom den omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid.

Med byggstart efter 2030 kommer större delen av kraftverkens långlivade avfall att mellanlagras. SKB beaktar inte en etappvis utbyggnad av SFL som ett handlingsalternativ, eftersom det långlivade avfallet utgör en begränsad volym. Det långlivade avfallet uppskattas motsvara en deponeringsvolym på ungefär 10 000 m³, under de aktuella förutsättningar som redovisas i avsnitt 6.1. Mot denna bakgrund anser SKB att mellanlagring av allt långlivat avfall är mer ekonomiskt effektivt än att påskynda utbyggnaden av SFL efter 2030 vilket skulle medföra en lång driftperiod.

Vi bedömer också att det kommer att finnas strålskyddsmässiga fördelar med att ta förvaret i drift i enlighet med SKB:s tidsplan. Till exempel är det en fördel om avfallet avklingat länge innan det hanteras eller omkonditioneras.

Förslutning av SFL planeras ske då allt mellanlagrat långlivat avfall samt det långlivade avfallet från rivningen av det sista kärnkraftverket placerats där. Innan förslutningen verkställs måste SKB säkerställa att det avfall som kommer från rivning av Clink är lämpligt för SFR och således inte behöver slutförvaras i SFL. I figur 4-1 har denna osäkerhet i tidsplanen illustrerats med streckade staplar.

4.3 Milstolpar

I detta avsnitt ges en kort beskrivning av de milstolpar som redovisats i tidsplanen för Loma-programmet, figur 4-1. Underrubrikerna representerar antingen en milstolpe eller flera sammanlagda milstolpar. Milstolpar som ligger närmare i tiden beskrivs utförligare än de som ligger längre fram.

4.3.1 Milstolpar för kortlivat drift- och rivningsavfall

Platsundersökningar för utbyggnaden av SFR

Platsundersökningarna i Forsmark inför utbyggnaden av SFR, med provborringar och andra undersökningar av berget med tillhörande analyser, påbörjades under år 2008 och planeras att kunna avslutas under första halvåret 2011. Provboringarna har genomförts och avslutats och efterföljande analysarbete pågår. Preliminära bedömningar visar att det i undersökningsområdet finns bergvolym som är lämpliga att använda för en utbyggnad av SFR.

Ansökan om utbyggnad av SFR enligt kärntekniklagen

Enligt kärntekniklagen krävs ett tillstånd av regeringen för att bygga ut SFR. Ansökan kommer att omfatta hela verksamheten, det vill säga befintlig anläggning och alla etapper i utbyggnaden. I samband med ansökan om utbyggnad planerar SKB att ansöka om att få slutförvara både drift- och rivningsavfall i hela anläggningen. I ansökan kommer SKB att redogöra för det tekniska underlag som krävs för att kunna avgöra om den befintliga och utbyggda anläggningen uppfyller de krav som ställs enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen med tillhörande föreskrifter och förordningar. SKB kommer i ansökan föreslå att villkor för kommande utbyggnadsetapper ska få fastställas av respektive tillsynsmyndighet, SSM och Länsstyrelsen.

Vilken dokumentation som kommer att utgöra direkt underlag till ansökan är ännu inte helt fastställt, men en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) av driftsäkerhet och långsiktig säkerhet kommer att ingå. Ansökan kommer också att innefatta en miljökonsekvensbeskrivning.

Om långlivat avfall ska mellanlagras i SFR kommer ansökan om mellanlagring att lämnas in i samband med ansökan för utbyggnad.

Ansökan om utbyggnad av SFR enligt miljöbalken

Inför utbyggnaden kommer SKB att ansöka om miljödomstolens tillstånd enligt kapitel 9 i miljöbalken (miljöfarlig verksamhet) för hela SFR-anläggningen. Enligt miljöbalkens nuvarande utformning är det sannolikt inte möjligt att få en prövning enbart av utbyggnaden (så kallat påbyggnadstillstånd), utan hela SFR kommer troligen att behöva prövas. Utbyggnaden av SFR kommer även att kräva tillstånd enligt kapitel 11 i miljöbalken (vattenverksamhet). En förutsättning för att tillstånd enligt miljöbalken ska kunna beviljas är, att verksamheten inte strider mot gällande detaljplan eller områdesbestämmelser.

Ansökan kommer att omfatta hela verksamheten, det vill säga befintlig anläggning och alla etapper i utbyggnaden. SKB kommer i ansökan föreslå att villkor för kommande utbyggnadsetapper ska få fastställas av respektive tillsynsmyndighet, SSM och Länsstyrelsen.

Om långlivat avfall ska mellanlagras i SFR kommer ansökan om mellanlagring att ske i samband med ansökan om utbyggnad.

Byggstart för utbyggnaden av SFR

När alla erforderliga tillstånd erhållits kan utbyggnaden av SFR påbörjas. SKB måste ta ställning till konsekvenserna av villkoren i tillstånden före byggstart och anpassa planeringen efter dessa.

Ansökan om provdrift samt rutinmässig drift av utbyggt SFR

När anläggningen är uppförd och system och processer fungerar som avsett, lämnar SKB in en ansökan om att inleda provdrift. Ansökan kommer att innehålla en förnyad säkerhetsredovisning (SAR) med uppdaterade analyser av driftsäkerheten och av den långsiktiga säkerheten, samt uppdaterade säkerhetstekniska driftförutsättningar. Provdriften är till för att erhålla erfarenheter inför den rutinmässiga driften. Säkerhetsredovisningen och de säkerhetstekniska driftförutsättningarna kommer att kompletteras och ingå som underlag till ansökan om att få påbörja rutinmässig drift av anläggningen.

4.3.2 Milstolpar för långlivat drift- och rivningsavfall

Ansökan om licensiering av transportbehållare ATB 1T

I början av år 2012 planerar SKB att ansöka hos franska myndigheter om licensiering av en transportbehållare (ATB 1T) för transport av BFA-tankar med långlivat låg- och medelaktivt avfall. Validering av licensen ska utföras av SSM.

Framtagning av hanteringsutrustning för hårdkomponenter

En för kärnkraftverken gemensam utrustning för hantering av hårdkomponenter har levererats till FKA och den har driftsatts under våren 2010. Arbeta med kontroll- och konstruktionsdokumentation pågår och kommer att avslutas under år 2010.

Utrednings- och offertarbete pågår för transportbehållare för kontaminerad hanteringsutrustning för hårdkomponenter. Behållarna behöver inte licensieras och ska med aktuell planering levereras under år 2011.

Mellanlagring av långlivat avfall i SFR

Vi planerar att kunna inleda mellanlagringen i SFR av långlivat avfall från kärnkraftverken i samband med att den rutinmässiga driften av den utbyggda anläggningen inleds.

Konceptstudie och säkerhetsanalys för SFL

En redovisning av olika förvarskoncept för SFL med bland annat en kvalitativ bedömning av deras långsiktiga säkerhetsfunktion kommer att presenteras år 2013. Målet med studien är att välja ett eller ett par förvarskoncept att arbeta vidare med. Studien kommer tillsammans med resultaten från övrigt SFL-arbete att ligga till grund för det fortsatta arbetet med att ta fram underlag till den säkerhetsanalys som planeras till år 2016. En mer detaljerad plan för arbetet fram till denna säkerhetsanalys redovisas i kapitel 6.

Platsval för SFL

Baserat på resultaten från den analys av den långsiktiga säkerheten som planeras till år 2016 kan preliminära krav på platsen för slutförvaret ställas. Det fortsatta forsknings- och säkerhetsanalysarbetet medför troligen modifieringar av kraven innan de används för att utvärdera en eventuell slutförvaringsplats. SKB:s inriktning är att i första hand utvärdera de platser som vi sedan tidigare har god kännedom om och vi avser att i en lokaliseringsutredning värdera om det är motiverat att genomföra undersökningar även på någon annan plats. Undersökningar av bergets egenskaper, liknande de som genomförts för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR, kommer att genomföras på den eller de platser som utpekats i lokaliseringsutredningen. Efter genomförda platsundersökningar utvärderas den eller de platser som undersökts och först därefter tas beslut om lokaliseringen av SFL.

Ansökningar om uppförande, provdrift och rutinmässig drift av SFL

Processen att etablera SFL kommer i många avseenden att likna den process som planeras och genomförs inom Kärnbränsleprojektet och Projekt SFR-utbyggnad. Ansökningar enligt kärntekniklagen respektive miljöbalken kommer att upprättas. Dessa ansökningar kommer att föregås av ett projekt som påminner om Kärnbränsleprojektet och Projekt SFR-utbyggnad och innehåller platsundersökningar, teknikutveckling, analys av den långsiktiga säkerheten, projektering med mera.

När alla erforderliga tillstånd har erhållits kan anläggningen uppföras. När anläggningen är uppförd och system och processer fungerar som avsett, lämnar SKB in en ansökan om att inleda provdrift. Efter att säkerhetsredovisningen och de säkerhetstekniska driftförutsättningarna sedan kompletterats kommer SKB att ansöka om att få påbörja rutinmässig drift av anläggningen.

4.3.3 Andra viktiga milstolpar

Blockspecifika rivningsstudier

SKB genomför tillsammans med kärnkraftsföretagen rivningsstudier för att successivt åstadkomma ett säkrare och mer detaljerat underlag för att bedöma avfallsvolymer, materialmängder, aktivitetsmängder och avvecklingskostnader för kärnkraftverken. Kommande studier genomförs för varje enskilt kraftverksblock och för varje kärnkraftverk. Studierna anpassas till de specifika förhållanden som råder vid respektive område i fråga om det fysiska utförandet av kraftverksbyggnader och i fråga om kärnkraftsföretagens planering för att avveckla det egna kärnkraftverket.

Resultaten av studierna kommer att ligga till grund för dimensioneringen av framtida slutförvar för rivningsavfall och för de säkerhetsanalyser som krävs i tillståndsprocessen.

Rivningsstudiernas teknikdel med avfallsvolymer och aktivitetsinnehåll planeras att färdigställas under första kvartalet 2011 och kostnadsuppskattningar för avveckling och rivning planeras att redovisas under år 2012.

I takt med att nya kunskaper inom rivningsområdet erhålls, kommer rivningsstudierna för de kärntekniska anläggningarna att uppdateras. Rivningsstudier och avvecklingsplaner kommer därvid att successivt förbättras i en iterativ process.

5 Hantering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Detta kapitel redovisar SKB:s planer och program avseende utbyggnad och drift av SFR, samt redogör för omhändertagandet av kortlivat låg- och medelaktivt drift- och rivningsavfall. Avsnitt 5.1 behandlar avfallshantering inklusive en beskrivning av den teknikutveckling som bedrivs av kärnkraftsföretagen, vid Clab samt av Studsvik Nuclear AB och AB SVAFO. Avsnitt 5.2 ger en redogörelse för driften av SFR och den utveckling som sker och planeras på anläggningen, medan avsnitt 5.3 redovisar nuläge och planerade aktiviteter för utbyggnaden av SFR. Avsnitt 5.4 redogör för den teknikutveckling som planeras för SFR och avsnitt 5.5 redovisar arbetet med markförvar.

5.1 Avfallshantering hos avfallsleverantörer

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

Fud-program 2007 innefattade en övergripande beskrivning av det låg- och medelaktiva avfallsets ursprung, mängder och typer.

SSM betonade att Fud-program 2010 ska omfatta en översikt av de åtgärder som behöver genomföras i slutförvarsprogrammet.

För att redovisningen i Fud-program 2010 ska uppfylla 12 § i kärntekniklagen krävs en översiktlig beskrivning även av de åtgärder som ligger utanför SKB:s åtagande gentemot kraftbolagen.

5.1.1 Uppkomst och karakterisering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

För att kunna hantera och lagra radioaktivt avfall är det nödvändigt att kategorisera det utifrån både nuklidernas halveringstid och aktivitetsinnehållet. Utifrån nuklidernas halveringstid grupperas avfallet i antingen kortlivat eller långlivat radioaktivt avfall, se avsnitt 1.1.3. Kortlivat avfall innehåller en signifikant mängd radionuklider med en halveringstid på maximalt 31¹ år och endast en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Långlivat avfall innehåller signifikanta mängder av radionuklider med långa halveringstider.

SKB har tillsammans med avfallsleverantörerna utarbetat rutiner för att på bästa sätt omhänderta det kortlivade radioaktiva avfallet. Baserat på avfallsleverantörernas avfallsplaner har deponeringsregler och acceptanskriterier för avfall till olika förvarsdelar i SFR tagits fram vilka redovisas i avsnitt 5.2.1. En förutsättning för att en viss avfallstyp ska kunna deponeras i SFR är att det finns en av SSM godkänd typbeskrivning² för avfallet.

Program

Kärnkraftverken har under senare år arbetat med att minimera utsläpp av aktivitet till omgivningen genom att indunsta golvdränage- och processvatten med mycket låg aktivitet, vilket tidigare släpptes ut. Att indunsta vatten med radioaktiva ämnen ger upphov till indunstarkoncentrat som måste slutförvaras. Olika metoder provas hos kraftverken för att behandla detta avfall, se avsnitt 5.1.2.

¹ Kortlivat avfall definieras enligt IAEA:s ”Radioactive Waste Management Glossary, 2003 Edition” som avfall som inte innehåller signifikanta nivåer radionuklider med halveringstider längre än 30 år. SKB använder samma definition men med 31 år för att inkludera cesium-137, vilken används som nyckelnuklid för att uppskatta innehåll av andra radionuklider.

² Typbeskrivning – Avser en säkerhetsrapport för den aktuella avfallstypen. I respektive typbeskrivning fastställs behållare, avfallskategori samt behandlingsform för avfallet.

Utöver provtagning av kol-14 och den forskning om kol-14 som redovisas i del IV, pågår ett utvecklingsarbete kring etablering av metoder för mätning av nickel-63 i vatten från reaktor- och bränslebassängsrening. En metod som studeras är kemisk separation genom jonkromatografi med efterföljande mätning av aktivitet för nickel-63. Med mätning av nickel-63 kan indirekt bestämning ske av nickel-59. Metodiken för provtagning sker enligt den etablerade rutinen för provtagning av transuraner och strontium-90 i aktuella reningskretsar hos kärnkraftverken.

5.1.2 Konditionering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Innan det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet transporteras till slutförvarsanläggningen behandlas det vid kärnkraftverken eller vid Studsviks avfallsbehandling. Förutom att förpacka avfallet kan syftet med behandlingen till exempel vara att reducera volymen, koncentrera aktiviteten eller modifiera de fysikaliska och kemiska egenskaperna.

De konventionella metoder som redan nu är etablerade på kärnkraftverken för att konditionera industarkoncentrat är solidifiering med bitumen eller cement. Även annat vått avfall behandlas genom solidifiering med cement eller bitumen eller genom avvattning. Vid solidifiering erhålls en avfallsform som är stabil och mer beständig mot lakning. Skrotavfall behandlas bland annat genom dekontaminering och/eller smältning, varvid fortsatt hantering förenklas och i vissa fall kan materialet friklassas.

UV-strålning kan användas för att bryta ner organiska ämnen i avfallet. Detta används bland annat i den kemiska dekontamineringsmetoden CORD (chemical, oxidizing, reduction, decontamination) där en organisk syra används. För att minska mängden organiska ämnen i dekontamineringslösningen behandlas denna i ett efterföljande UV-behandlingssteg. Eftersom lösningen måste deponeras är minskningen gynnsam för förvarets långsiktiga säkerhet.

Program

På kärnkraftverken arbetar man med olika utvecklingsprojekt i syfte att kunna omhänderta tillkommande avfallsströmmar med industarkoncentrat och i vissa fall slam.

På kärnkraftverken i Forsmark och Ringhals utprovas två olika metoder för att kunna behandla industarkoncentrat för att minimera mängden organiska ämnen och salter i de färdigkonditionerade avfallskollina.

På kärnkraftverket i Ringhals testas en metod för elektrokemisk nedbrytning av organiska ämnen i industarkoncentrat. Återstoden av materialet efter elektrokemisk behandling av aktuella avfallsströmmar, planeras att konditioneras med betong. Målet är att avfallet efter denna process kan deponeras i SFR.

På kärnkraftverket i Forsmark provas behandling av industarkoncentrat med plasmaförbränning. I denna process bryts organiska ämnen ned och salter förglasas i den höga temperaturen. Återstoden blir ett förglasat avfall, vilket skulle ha en liten inverkan med avseende på salt och komplexbildande ämnen i ett slutförvar. Projektet är i sitt slutskede och beslut om eventuellt införande och provdrift beräknas fattas inom kort.

På initiativ av OKG och Studsvik har ett projekt inletts med syfte att utveckla en metod för volymreducering av komponenter, vilka kräver stor deponeringsvolym i förhållande till sitt materialinnehåll, i första hand ångseparatorer. Genom att kompaktera eller sönderdela komponenterna kan mer material packas i varje kolla och behovet av utrymme i förvaren minskas. Resultatet av arbetet har hittills varit framgångsrikt och ett beslut har fattats om att genomföra en utökad studie med syfte att undersöka om och i så fall hur denna metod kan utvecklas och appliceras på fler komponenter än ångseparatorerna.

5.2 SFR – slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

I regeringsbeslutet angående Fud-program 2007 ställdes som villkor att SKB ska komplettera redovisningen i Fud-program 2007 med tydligare planer och program för utbyggnad och drift av SFR samt en preliminär redogörelse för omhändertagandet av drift- och rivningsavfall i SFR. Redovisningen skulle utformas så att den ger ett underlag för SSM att bedöma om redovisningen i Fud-program 2010 blir av tillräcklig omfattning.

Regeringen ställde också som villkor att redovisningen i Fud-program 2007 skulle kompletteras med ett underlag, som i kvantitativa termer visar på möjligheter och svårigheter att deponera rivningsavfall i det befintliga SFR.

I kompletteringen av Fud-program 2007 redovisade SKB möjligheter och svårigheter att påbörja deponering av rivningsavfall i det befintliga SFR vid olika tidpunkter. SSM bedömde att redovisningen var tillräckligt underbyggd och godtagbar, vilket innebär att det huvudsakliga syftet med denna del av kompletteringen av Fud-program 2007 har uppfyllts. SSM baserade sitt ställningstagande i första hand på bedömningen att avfallsmängderna är för stora för ett optimalt utnyttjande av det befintliga SFR.

SSM betonade att Fud-program 2010 ska omfatta en översikt av de åtgärder som behöver genomföras i slutförvarsprogrammet.

5.2.1 Drift av anläggningen

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall är en bergrumsanläggning i Forsmark med cirka 60 meters bergtäckning som nås via tillfartstunnlar från markytan. Förvaret är uppdelat i olika förvarsdelar, vilka har utformats med hänsyn till det avfall som ska placeras i dem, se figur 5-1. SFR har varit i drift sedan år 1988 och drivs sedan den 1 juli 2009 av SKB.

Reglerna för fördelningen av avfallet mellan de olika förvarsdelarna i SFR bygger på principerna BAT (Best Available Technique) och ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

De övergripande funktionskraven på avfall avsett för deponering i SFR är:

- Avfallskollin ska inte ge upphov till oacceptabel spridning av radionuklider.
- Avfallskollin ska kunna hanteras utan oacceptabel påverkan av joniserande strålning på personal och allmänhet.

Det är i första hand avfallens ursprung som är styrande för i vilken förvarsdel det ska deponeras. Ett etablerat ledningssystem finns inom SKB med bland annat rutiner för granskning av avfallsdata och typbeskrivningar samt för hantering av avfall som ska till SFR. Deponeringsregler och acceptanskriterier för avfall som ska till olika förvarsdelar framgår av SKB:s avfallshandbok för låg- och medelaktivt avfall och de redovisas i tabell 5-1.

Styrningen av avfallsströmmarna till SFR baseras på kommunikation mellan driftansvariga och personer med kunskap om förvarets långsiktiga säkerhet. För erfarenhetsåterföring finns ett etablerat forum (Loma-gruppen) som består av representanter från kärnkraftverken, Studsvik, SVAFO, SFR, Clab och avdelningen för låg- och medelaktivt avfall på SKB. Syftet med forumet är att informera och utreda frågor som rör låg- och medelaktivt avfall samt att planera det kommande årets transporter av avfall. Loma-gruppen träffas två gånger per år.

Program

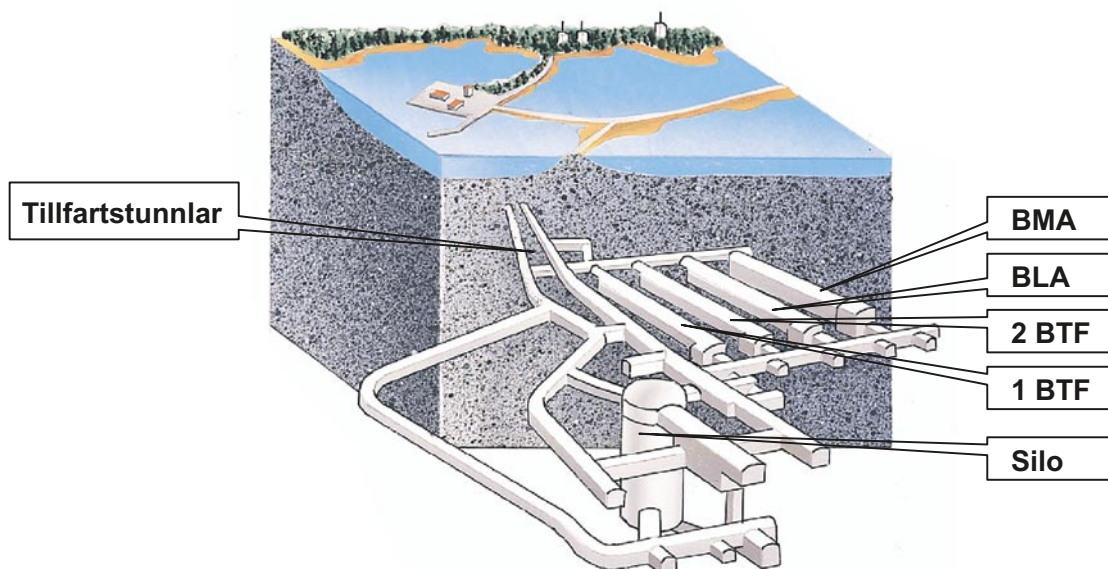
Optimering av placeringen av olika avfall i SFR bör på sikt omfatta såväl drift- som rivningsavfall och vara baserad på för dagen bästa kunskap om aktivitetens innehåll i avfallet och andra egenskaper som kan påverka styrningen av avfallet till olika förvarsdelar. En plan för hur SFR med sin planerade utbyggnad på bästa sätt kan utnyttjas, kommer att tas fram i samband med att ansökningarna om en utbyggnad av SFR lämnas in.

Tabell 5-1. Acceptanskriterier för avfall till SFR. Tabellen är baserad på avfallsleverantörernas och SKB:s deponeringsplaner.

Avfallstyp	Avfallsets fördelning mellan försvarsdelarna			
	BLA	BTF	BMA	Silo
Övergripande dosratskrav för de olika försvarsdelarna				
	< 2 mSv/h	< 10 mSv/h	< 100 mSv/h (20 % > 30 mSv/h)	< 500 mSv/h
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från BWR-reaktorer	Efter särskild prövning i undantagsfall	System 332, 342 Lågaktiva kokiller efter särskild bedömning	System 332, 342 Efter särskild bedömning system 324, 331	System 331, 324 även mindre aktiva system tillåtliga
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från PWR-reaktorer och olika system	Efter särskild prövning i undantagsfall	Lågaktiva betongkokiller efter särskild bedömning	System 417, 330, 342, 334, 324, 336 efter särskild bedömning	System 417, 330, 334, 336, 337, 342, 324
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från Clab	–	–	–	System 313, 324, 371, 372
Slam, torkat sediment	Efter bedömning torkat sediment	Slam i betongtankar	Torkat sediment i sopor och skrotkokiller	
Indunstarkoncentrat från BWR- och PWR-reaktorer	–	–	Koncentrat som härrör från olika dränagesystem och tvättstugevatten	
Jonbytarmassor, filterhjälpmedel och slam från Studsvik	–	–	Efter särskild prövning slam från vattenrening	Efter särskild prövning äldre avfall från Ågesta, R2 med mera
Sopor och skrot från BWR	Normalt sopor och skrot från mellanbyggnad, avfallsbyggnad, turbin och generatorbyggnad, efter bedömning avfall från reaktorbyggnad, sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	–	Normalt sopor och skrot från reaktorbyggnad och turbin, sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	Skrot med höga dosrater och högt nuklidinnehåll efter bedömning
Sopor och skrot från PWR	Normalt sopor från reaktorbyggnad, sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	–	Normalt sopor och skrot från reaktorbyggnad, sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	Skrot med höga dosrater och högt nuklidinnehåll efter bedömning
Sopor och skrot från Clab	–	–	Normala sopor och skrot	Skrot och filterpatroner
Askor från Studsvik	–	Askor från förbränning av sopor	Askor från förbränning av sopor	–
Sopor och skrot från Studsvik	Lågaktivt skrot R2, HCL, ACL, avfallsanläggning, avvecklade anläggningar, sjukhus, institutioner, ABB ATOM (Westinghouse Electric Sweden), kärnkraftverk	–	Medelaktivt skrot R2, HCL, ACL, avfallsanläggning, avvecklade anläggningar, sjukhus, institutioner, ABB ATOM (Westinghouse Electric Sweden), kärnkraftverk	Brandvarnare innehållande americium-241

Förklaringar: 313- Kyl- och rengingssystem för mottagningsbassänger, 324- Kyl- och rengingssystem för bassänger, 330- Allmänt för kemi- och rengingssystem, 331- Rengingssystem för reaktorvatten, 332- Kondensatreningsystem med precoatfilter, 334- Kemi- och volymkontrollsystem, 336- Kemiprovtagningsystem, 337- Bottenblåsningssystem, 342- System för vätskeformigt aktivt avfall, 371- Rening av processvatten, 372- Rening av golvdränagevatten, 417- Bottenblåsningssystem.

R2- Reaktorplanläggning R2 i Studsvik, HCL- Hotcelllaboratorium, ACL- Aktivt centrallaboratorium.



Figur 5-1. Översikt över befintlig SFR-anläggning med tillfartstunnlar och de olika förvarsdelenarna utmärkta: Silo och BMA för det medelaktiva avfallet med mest aktivitet, BTF-förvaren för medelaktivt avfall med lägre aktivitetsnivåer och BLA för lågaktivt avfall. (BMA – Bergsal för medelaktivt avfall, BTF – Betongtankförvar, BLA – Bergsal för lågaktivt avfall.)

5.2.2 Underhåll

När SFR byggdes var avsikten att anläggningen skulle ta emot kortlivat låg- och medelaktivt avfall fram till och med år 2010.

Nu planeras kärnkraftverken att drivas under avsevärt längre tid än vad som planerades när SFR byggdes. Detta medför att SFR:s driftskede kommer att pågå under längre tid än vad som ursprungligen planerades. Utökad drifttid ställer nya krav på underhållet av anläggningen.

Säkerheten, oavsett driftskedets längd, bygger på anläggningens grundkonstruktion, användningen av robusta och beprövade system och komponenter samt ett underhållsprogram som förutom avhjälpan och förebyggande underhåll inkluderar ett program för identifiering, hantering och förebyggande av åldersrelaterade försämringar och skador.

Innan SKB övertog driften av SFR styrdes underhållet via rutiner framtagna av FKA. I samband med att vi tog över ansvaret för driften i egen regi gick vi över till att använda vårt eget drift- och underhållssystem GDU (gemensamt drift- och underhållssystem) som redan används på Clab också för SFR. GDU är det system som OKG använder.

Program

En utredning har inletts som syftar till att systematiskt gå igenom hela SFR-anläggningen för att kartlägga status, både avseende system och byggnader. Utredningen ska ge förslag på åtgärder som behöver utföras under de närmaste åren eller före det att utbyggnaden påbörjas och vilka som kan genomföras i senare skeden för att anläggningen ska kunna drivas under lång tid. Utredningen ska slutföras under 2011.

5.2.3 Informationshantering avseende avfall vid mellanlagring och deponering

Kärnkraftverken och Studsvik har system för registrering och rapportering av avfallskollin. Dessa system bygger på SSM:s krav på registrering och rapportering av radioaktivt avfall.

SKB har en egen avfallsdatabas, Triumf, vars huvudfunktion är att administrera information om innehåll, egenskaper och placering av avfallskollin i SFR. För framtida avfallskollin återfinns information om till exempel antal mellanlagrade avfallskollin på kärnkraftverken och framtida årsproduktion av avfallskollin per avfallstyp. Databasen innehåller även information om avfallstransportbehållarna och

SFR-anläggningen. Informationen i Triumf överförs från avfallsleverantörernas databaser, genom att en krypterad fil som innehåller avfallsdata skickas till Triumf. Dataöverföringen sker innan avfallet transporteras till SFR och alla data måste godkännas av SKB innan en transport får genomföras. När transporten är genomförd och avfallet har deponerats kompletteras databasen bland annat med uppgifter om var enskilda kollin deponerats i SFR.

Informationen i Triumf används också för rapportering till myndigheter, planering av transport och deponering samt framtagande av prognoser för framtida deponering.

Program

Uppdatering av avfallsdatabasen Triumf pågår. Rapport- och prognosmodulen kompletteras med nya beräkningsmetoder och rapportframtagningen automatiseras ytterligare. Lagerplatserna på SFR får samtidigt nya vyer, vilket bland annat underlättar arbetet vid deponering, och en historikfunktion utvecklas för bättre spårbarhet.

SKB ska under kommande år se över möjligheten att integrera prognostiserat rivningsavfall i avfallsdatabasen för att underlätta framtagning av prognoser.

Radioaktivt avfall som genereras på exempelvis kärnkraftverken registreras i dag i lokala databaser på respektive anläggning. På SKB pågår framtagning av en gemensam avfallsdatabas för kärnkraftverken, SKB och Studsvik. Studsvik ska ha tillgång till databasen via ett externt gränssnitt.

Den gemensamma databasen är tänkt att hantera all information beträffande låg- och medelaktivt avfall som ska deponeras i SFR, i ett framtida SFL och som uppstår vid drift av de kärntekniska anläggningarna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals samt på Clab och SFR. SKB ansvarar för förvaltningen av databasen. Samtliga intressenter ska kunna mata in data för avfallskollin i databasen när dessa skapas på respektive anläggning.

5.3 Utbyggnad av slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

I detta avsnitt redovisas SKB:s planer för utbyggnaden av SFR. Den planerade utbyggnaden innebär att anläggningens lagringskapacitet ökar med uppskattningsvis 140 000 m³ från dagens kapacitet på 63 000 m³. Nya preliminära studier av de volymer avfall som kommer att uppstå då kärnkraftverken rivs indikerar att utbyggnaden kan göras mindre. När dessa studier har fastställts ger de nya förutsättningar för utbyggnaden.

Redovisningen omfattar huvudskedena till och med rutinmässig drift. Syftet är att ge en helhetsbild av nuläget i planeringen så att tillämpningarna av resultaten från forskning, utveckling och demonstration i olika skeden lättare kan överblickas. Fokus för det pågående arbetet är framtagningen av ansökningshandlingar.

Utöver de planerade obligatoriska samråden enligt miljöbalken genomförs även samrådsmöten med SSM. Resultat, status och planer redovisas successivt och detaljerat inom ramen för dessa samråd. Därigenom får vi fortlöpande värdefulla synpunkter som kan beaktas i det fortsatta arbetet.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

I kompletteringen av Fud-program 2007 skrev SKB att man i Fud-program 2010 kommer att ge en mer utförlig bild av programmet för utbyggnad av SFR, med huvudskeden och tidsplan. Vi angav att den utbyggnad som planeras kommer att dimensioneras för att rymma allt avfall från drift och rivning av kärnkraftverken, Ågestareaktorn och forskningsreaktorerna i Studsvik. Ansökningarna kommer att omfatta hela den tillkommande utbyggnaden, men planerna var inte definitiva avseende om utbyggnaden ska ske i ett eller två steg.

SSM ansåg att SKB:s redovisning i kompletteringen, avseende planer och program för SFR, var otydlig jämfört med vad som redovisats för myndigheten i andra sammanhang. SSM betonade att redovisningen behöver vara tillräckligt omfattande för att Fud-programmet ska fylla sitt syfte, det vill säga omfatta en översikt av de åtgärder som behöver genomföras i slutförvarsprogrammet.

SSM ansåg därför att redovisningen behöver utvecklas och konkretiseras i Fud-program 2010, till exempel vad gäller utbyggnadens utformning, dimensionering samt genomförande av platsundersökning, lokalisering och planer för uppförande.

SKB förde fram möjligheten att även använda ett utbyggt SFR som mellanlager för långlivat låg- och medelaktivt avfall. SSM har i princip inga invändningar mot detta, förutsatt att mellanlagringen uppfyller gällande krav och att framtida tillstånd enligt kärntekniklagen och miljöbalken medger detta.

5.3.1 Huvudskeden och tidsplan

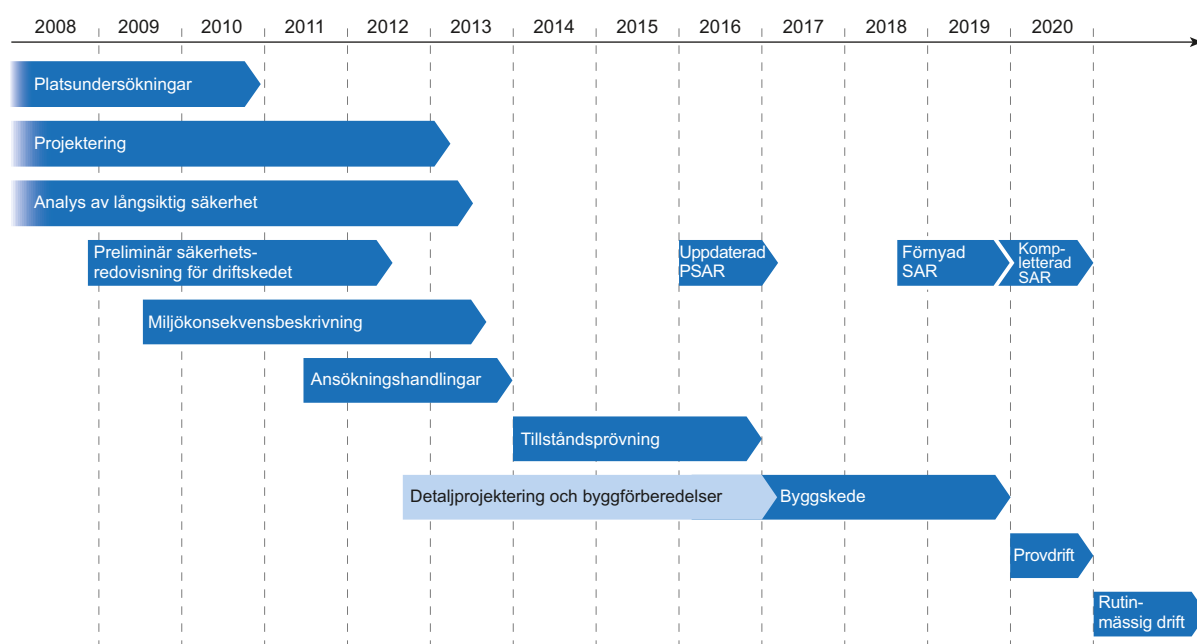
SKB:s övergripande tidsplan för genomförandet av utbyggnaden av SFR visas i figur 5-2.

Framtagning av ansökningshandlingar, 2008–2013

Projekt SFR-utbyggnad startade under år 2008 och har till uppgift att utarbeta ansökningshandlingar enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen samt en byggplan för utbyggnaden. Projektet sträcker sig fram till och med år 2013, då ansökningshandlingarna planeras lämnas in till miljödomstolen respektive SSM för beredning till regeringen. Skedet omfattar platsundersökningar, projektering av anläggningen, analys av långsiktig säkerhet, framtagning av preliminär säkerhetsredovisning för driftskedet, samråd om och framtagning av miljökonsekvensbeskrivning, sammanställande av ansökningshandlingar samt en del av aktiviteten för detaljprojektering och byggförberedelser, vilket bland annat innebär framtagning av systemhandlingar.

Tillståndsprövning, 2014–2016

Tillståndsprövningen startar när ansökningarna enligt miljöbalken och kärntekniklagen har lämnats in, vilket beräknas ske år 2013. Då ska ansökningarna handläggas och granskas av myndigheter, miljödomstol, kommun och regering. Under denna period ligger initiativet till stor del hos dessa instanser och tidsåtgången beror på deras handläggnings- och beslutstider. SKB:s huvuduppgifter under denna tid är att på olika sätt medverka i tillståndsprocessen, samt att förbereda arbetet med att genomföra utbyggnaden av SFR. Om kommentarer av sådan art uppstår att en uppdatering av inlämnad PSAR (preliminär säkerhetsredovisning) föranleds innan utbyggnad startar, genomförs en sådan uppdatering under detta huvudskede.



Figur 5-2. Översiktlig tidsplan för utbyggnad av SFR.

Parallellt med tillståndsprovningen pågår fortsatt deltaljprojektering och byggförberedelser. Förutsatt att tillståndsprocessen löper smidigt förväntas nödvändiga tillstånd erhållas så att bygget kan inledas i början av år 2017.

Utbyggnad och överlämning till driftorganisation, 2017–2020

Huvudskedet utbyggnad och överlämning till driftorganisation omfattar aktiviteterna bygge, provdrift och överlämning till rutinmässig drift. Innan provdrift påbörjas tas en förnyad SAR fram, vilken ska kompletteras med erfarenheter från provdriften innan den rutinmässiga driften tar vid.

Utbyggnaden av SFR innefattar uppförande, verifiering av krav och konstruktionsförutsättningar samt driftsättning. Utbyggnaden betraktas som flera efterföljande ändringar av det befintliga SFR. Varje ändring som genomförs på SFR ska genomföras enligt gällande projektmodell för anläggningsändringar, vilken bland annat styr driftsättning av anläggningsändringen. Beroende på hur arbetsprocesserna ser ut vid tidpunkten, kommer den vid det tillfället gällande projektmodellen för anläggningsändringar att användas.

Utbyggnaden av SFR får inte påverka säkerheten i det befintliga SFR på ett oacceptabelt sätt. För att säkerställa detta, kommer SKB att tillämpa vid tillfället gällande system för säkerhetsledning med definierade driftledningsnivåer, vilket i dag innebär en rutinmässig övervakning och uppföljning av de beslut som fattas i säkerhetsfrågor. Varje ärende för anläggningsändring kommer att säkerhetsgranskas enligt de rutiner som gäller på SKB för primär och fristående säkerhetsgranskning.

Enligt projektmodellen för anläggningsändringar avslutas processen med en överlämning till driftorganisationen. Projektet kommer därefter att utvärderas av alla inblandade parter såsom beställare och driftledning genom att en slutrapport sammanställs. När slutrapporten är godkänd av projektets beställare och alla eventuella restpunkter mot driftledningen är stängda, är projektet avslutat. Beslut om projektavslut fattas då av projektets beställare.

5.3.2 Överordnade krav på anläggningen

För befintlig SFR-anläggning finns två principiella säkerhetsfunktioner: begränsning och fördröjning. Begränsning innebär att mängden tillåten aktivitet i förvaret begränsas. Fördröjning innebär att transporten av radionuklider från avfallet till biosfären ska fördröjas tillräckligt länge så att de inte ger radiologiska konsekvenser. SFR har således ingen absolut isolerande funktion. För utbyggnaden av SFR gäller samma principiella säkerhetsfunktioner som för befintligt SFR.

Anläggningen ska så långt som det är ekonomiskt rimligt utformas så att risken för aktivitetsspridning och persondoser minimeras. Förvarsutrymmena ska, med hänsyn tagen till de olika typerna av avfall, utformas så att de i samverkan med avfallskollin uppfyller önskad barriärfunktion. Vidare ska barriärsystemet och anläggningen i övrigt konstrueras på ett sådant sätt att det är möjligt att bygga ut förvaret i etapper.

Utbyggnaden av SFR ska dimensioneras för att kunna omhänderta allt tillkommande kortlivat låg- och medelaktivt driftavfall samt allt kortlivat rivningsavfall som bedöms uppstå vid rivningen av samtliga kärnkraftverk, inklusive Ågestareaktorn, forskningsreaktorerna vid Studsvik och Clink. Vid dimensioneringen av SFR tas även hänsyn till avfallsvolymer som finns i anläggningar i Studsvik, i vilket avfall från sjukhus, forskning och industri ingår.

Sammanfattningsvis ska utbyggnaden av SFR dimensioneras för:

- allt driftavfall som uppstår under den nu planerade drifttiden av kärnkraftverken (50 års drifttid för Ringhals och Forsmark, 60 år för Oskarshamn),
- allt kortlivat rivningsavfall från de befintliga kärnkraftverken, inklusive Ågesta,
- allt kortlivat driftavfall från Clab respektive Clink,
- allt kortlivat rivningsavfall från Clink,
- de volymer avfall och den aktivitet som finns avtalade med Studsvik och SVAFO,
- slutlagring av stora komponenter inklusive hela BWR-reaktortankar utan kraftigt neutronaktiverade interndelar.

Vidare ska Projekt SFR-utbyggnad utreda möjligheten att mellanlagra långlivat avfall från kärnkraftverken.

Mängd kortlivat driftavfall

Mängden kortlivat driftavfall som planeras att deponeras i SFR fram till år 2069 beräknas i dag till cirka 65 000 m³. Den beräknade volymen är en summering av hittills deponerad volym (till och med 31 december 2009) samt prognostiserad volym grundad på inrapporterad information från leverantörer av radioaktivt avfall. Prognoserna bygger på avtalade volymer med Studsvik och SVAFO, 50 års reaktordrift av reaktorerna i Forsmark och Ringhals och 60 år för Oskarshamn. Driftavfallet från inkapslingsanläggningen har bedömts motsvara Clabs avfallsvolymer. Figur 5-3 visar resultatet av den senaste prognosen av drift- och rivningsavfall. Prognosen för rivningsavfall baseras på preliminära versioner av rivningsstudier.

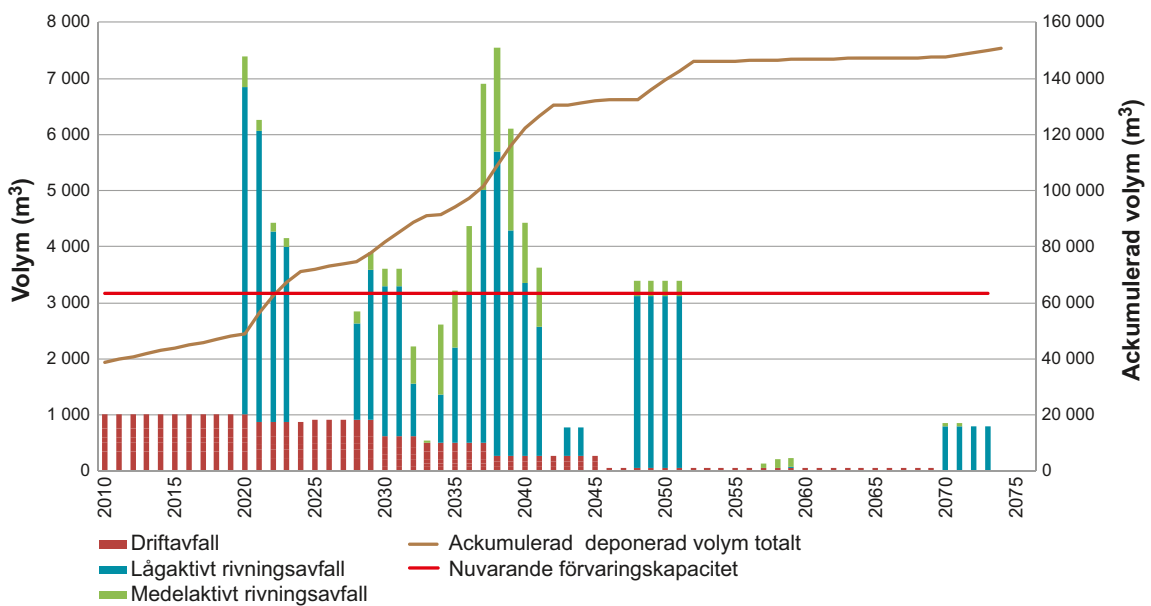
Mängd kortlivat rivningsavfall

Kortlivat rivningsavfall omfattar avfall från rivningen av de svenska kärnkraftverken, Ågesta-reaktorn, forskningsreaktorerna i Studsvik och Clink. Mängden kortlivat rivningsavfall blir, enligt preliminära uppskattningar, cirka 85 000 m³. Uppskattningarna bygger på preliminära avvecklingsplaner, befintliga rivningsstudier och indikationer på volymer från pågående blockspecifika rivningsstudier. När dessa rivningsstudier har fastställts ger de nya förutsättningar för utbyggnaden av SFR.

En ny uppskattning av hur mycket rivningsavfall som utbyggnaden av SFR ska dimensioneras för kommer att sammanställas under år 2011.

Osäkerheter i avfallsvolymer

Hur stor avfallsvolym som i framtiden kommer att deponeras i SFR beror på en rad faktorer. För driftavfall påverkar bland annat kärnkraftverkens drifttrender och den teknikutveckling som kärnkraftverken driver för uppkomst och konditionering av avfall, exempelvis kompaktering av stora komponenter, se avsnitt 5.1.



Figur 5-3. Prognos för volymer av kortlivat driftavfall och rivningsavfall till SFR. Den volym avfall som uppstår under ett år läses av på den vänstra axeln. Den bruna kurvan visar den ackumulerade volymen avfall och läses av på den högra axeln. Ackumulerad volym kan jämföras mot den nuvarande förvaringskapaciteten (den röda linjen).

En stor källa till osäkerhet är möjligheten att en del av rivningsavfallet friklassas eller placeras i markförvar i stället för i SFR, se avsnitt 5.5. Utifrån den kunskap som i dag finns om friklassningskrav och krav som ställs på dagens markförvar, bedöms ungefär en tredjedel av rivningsavfallet kunna friklassas eller placeras i markförvar.

Mellanlagring av långlivat avfall

Utbyggnaden av SFR dimensioneras för mellanlagring av långlivat avfall från kärnkraftverken. En preliminär uppskattning av denna volym är 2 600 m³, vilket inkluderar hårdkomponenter som kommer från drift och rivning av de svenska kärnkraftverken. Utbyggnaden ska dimensioneras efter kraftbolagens behov och när i tiden SFL planeras att stå klart för att ta emot avfall.

SKB utreder de tekniska krav som mellanlagring av hårdkomponenter och PWR-reaktortankar kan ställa på utbyggnaden av SFR. Utredningarna omfattar följande:

- Generisk avfallsbeskrivning för mellanlagring av hårdkomponenter i BFA-tankar och PWR-reaktortankar.
- Konstruktionsförutsättningar för att kunna mellanlagra BFA-tankar med hårdkomponenter och PWR-reaktortankar.
- Konsekvenser för den långsiktiga säkerheten.
- Konsekvens för driften och omgivningen vid en onormal händelse vid nedtransport, utlastning och mellanlagring av hårdkomponenter och PWR-reaktortankar i SFR.

5.3.3 Lokalisering

Att lokalisera ett slutförvar för kortlivat rivningsavfall i anslutning till SFR förefaller logiskt av många skäl, bland annat eftersom den befintliga anläggningen fungerar väl och rivningsavfallet är av liknande karaktär som driftavfallet. Inom ramen för Projekt SFR-utbyggnad har SKB studerat även andra lokaliseringalternativ. Inget av dessa alternativ har sammantaget befunnits vara bättre än en utbyggnad av SFR-anläggningen. I samrådet om den planerade verksamheten kommer SKB, i enlighet med miljöbalkens krav, att ta upp verksamhetens lokalisering, omfattning, utformning och förutsedd miljöpåverkan. Anläggningens driftsäkerhet kommer att studeras och en säkerhetsanalys kommer att genomföras för att undersöka om den valda platsen är lämplig på lång sikt.

5.3.4 Återkoppling från platsundersökningar

SKB genomför platsundersökningar med syfte att kartlägga berget och dess egenskaper i det område i Forsmark som är aktuellt för en utbyggnad av SFR och som har relevans för anläggningens byggharhet och långsiktiga säkerhet. Målet var att undersöka en bergvolym stor nog att kunna inrymma hela utbyggnaden. Undersökningarna påbörjades under år 2008 och planeras att avslutas under första halvåret 2011.

Planeringen för utbyggnaden av SFR startade under år 2007 då ett undersökningsprogram togs fram /5-1/. Undersökningsprogrammet föregicks av en förstudie. I förstudien studerades och i vissa delar systematiserades det omfattande dataunderlaget från tidigare undersökningar i området, dels i samband med förundersökningar och bygge av Forsmarks kärnkraftverk och den befintliga SFR-anläggningen, dels vid SKB:s avslutade platsundersökning avseende Kärnbränsleförvaret. Utifrån denna datagenomgång utarbetades en första version av en ny platsbeskrivande modell för geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi. Denna modell tjänade sedan som utgångspunkt för det fortsatta modelleringsarbetet.

SKB har i samband med platsundersökningarna för Kärnbränsleförvaret redovisat en serie undersökningsprogram /5-2, 5-3, 5-4/. Dessa program har utgjort en grund för framtagning av undersökningsprogrammet för utbyggnaden av SFR vad avser undersökningsstrategi och -metodik. Erfarenhetsåterföring från den genomförda platsundersökningen i Forsmark för Kärnbränsleförvaret är också ett viktigt underlag för undersökningsprogrammet, liksom lärdomar från undersökningarna i samband med byggandet av SFR på 1980-talet. Slutligen var drifterfarenheter från SFR-anläggningen ett viktigt stöd för utformningen av undersökningsprogrammet i allmänhet och i synnerhet för de delar av programmet som har bedrivits från den befintliga anläggningen.

Valet av undersökningsstrategi har främst styrts av följande underlag och förutsättningar:

- SFR-anläggningen ska byggas ut i direkt anslutning till den befintliga anläggningen, om inte geologiska eller andra förhållanden visar sig uppenbart ogynnsamma.
- Erfarenheterna från platsundersökningarna i omedelbar närhet till SFR-området ska tas till vara.
- Vid genomförandet av undersökningarna ska nödvändig hänsyn tas till driften i den befintliga SFR-anläggningen.
- Att inom tillgänglig tid genomföra platsundersökningarna.

Med den första versionen av den platsbeskrivande modellen som utgångspunkt, fastlades en övergripande undersökningslogistik där ett område i direkt anslutning till den befintliga SFR-anläggningen prioriterades. Det prioriterade området ligger sydost om den befintliga anläggningen och valdes bland annat på grund av den goda bergkvaliteten i nedre byggtunneln i SFR samt att markmagnetiska undersökningar inte indikerar några större brantstående deformationszoner i området.

I undersökningsprogrammet /5-5/ beskrevs detaljerade undersökningar i det prioriterade området. En förutsättning för att starta undersökningarna i det prioriterade området var att: om de inledande undersökningarna indikerar att det prioriterade området inte uppfyller de bergtekniska och övriga krav som måste ställas på anläggningen, flyttas undersökningarna till nytt undersökningsområde.

Resultat från undersökningar

Platsundersökningarna startade i april 2008 då de första undersökningsborrhålen borrades och ett sista borrhål borrades från en ö sydost om förvaret i september 2009. Totalt har fyra hammarborrhål och åtta kärnborrhål borrats och undersökts, se figur 5-4. Cirka 3 000 meter borrhållängor har analyserats och preliminära data visar på bra bergkvalitet i området, som till största delen består av metagranit och pegmatit med en genomsnittlig frekvens på 3–4 öppna sprickor per meter.

Undersökningarna i borrhålen har omfattat BIPS (Borehole Image Processing System), borrhålsradar, geofysisk borrhålsloggning (naturlig gamma, magnetisk susceptibilitet, temperatur, vätske-resistivitet, densitet etc), differensflödesloggning (spricktransmissivitet, elektrisk konduktivitet, flödesriktning etc), vattenkemiprovtagning och tryckmätning. Det fortsatta arbetet innefattar data-analyser, modellering och hydromonitoring.

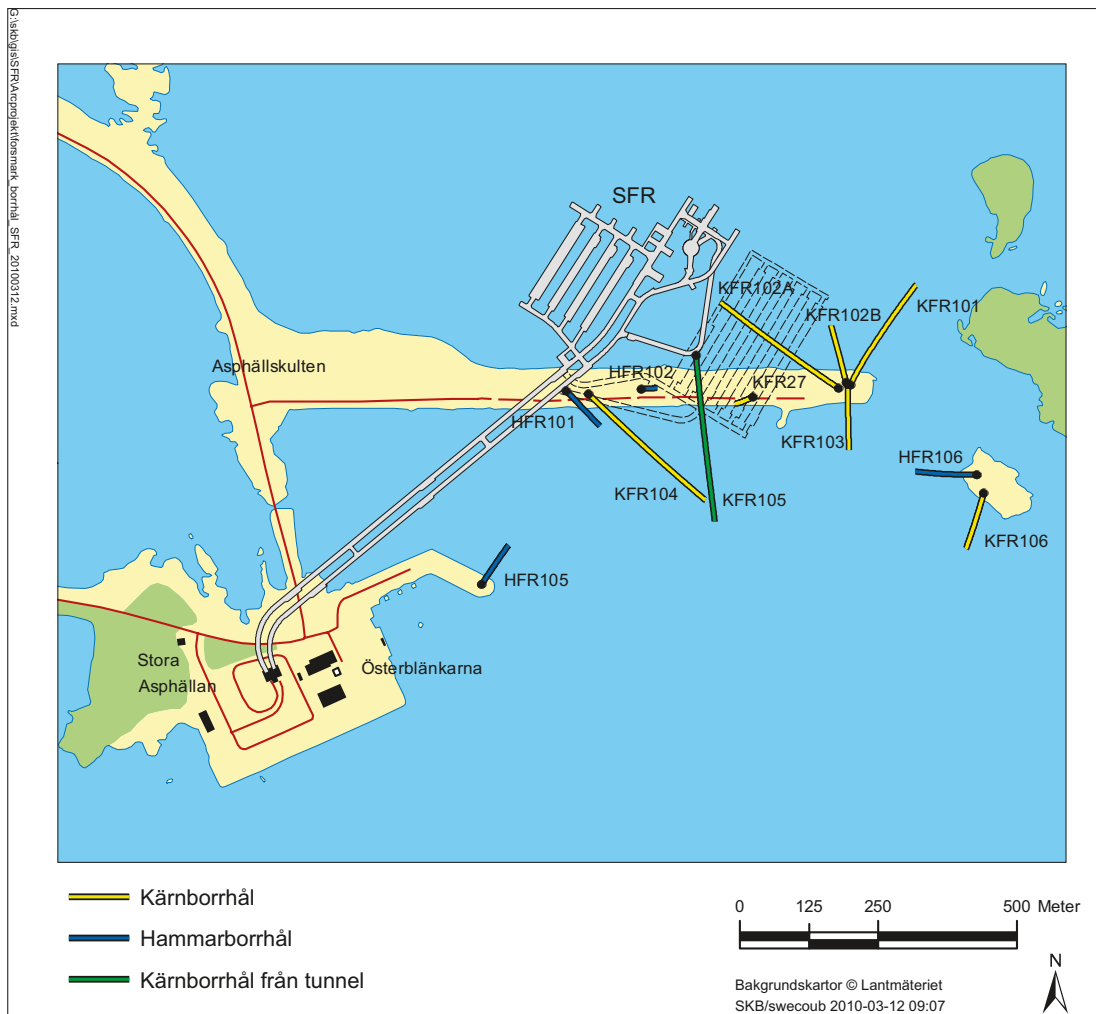
Kvalitetsarbetet för undersökningarna bygger på erfarenheter från platsundersökningarna för Kärnbränsleförvaret och har fungerat bra även i detta projekt.

Erfarenheter har erhållits om att arbeta i en kärnteknisk anläggning då aktiviteter utförts nere i SFR. Bland annat har ett 300 meter långt nästan horisontellt borrhål borrats och undersökts. De horisontella borrhålsundersökningarna har även givit viktiga erfarenheter för kommande projekt och en ny utrustning för att flytta mätutrustning längs borrhål har utvecklats och testats med goda resultat.

Det prioriterade området som ligger sydost om den befintliga anläggningen kan utgöra en lämplig plats för utbyggnad av SFR. Detta baseras på att en tillräckligt stor bergvolym mellan större deformationszoner har identifierats. För att slutligt kunna bestämma exakt placering och utformning av utbyggnaden återstår ytterligare arbete med utvärdering och analyser av främst den långsiktiga säkerheten.

Modellering och platsbeskrivning

Modellering kommer att ske parallellt och integrerat med undersökningarna inom de olika ämnesområdena, främst geologi, hydrogeologi och hydrogeokemi. Generellt kan modelleringprojektet sägas omfatta kvalitetskontroll av data, utvärdering och analys av primärdata, tredimensionell modellering och rapportering. Slutresultatet är en platsbeskrivande modell för det undersökta området.



Figur 5-4. Karta som visar borrhållslägen för undersökningar för utbyggnad av SFR. Figuren visar ett exempel på preliminär layout för utbyggnadens deponeringsområde.

Platsbeskrivningen behövs i samband med projekteringen när slutförvaret ska placeras in och utformas på den plats som undersökts. Den ger också underlag för analys av slutförvarets långsiktiga säkerhet. Dessutom kan den klargöra behovet av eventuella ytterligare data som behöver samlas in. Platsbeskrivningen är inte enbart begränsad till att beskriva försvarsplatsen utan omfattar även dess regionala omgivning i den utsträckning detta är nödvändigt för ändamålet. I den geovetenskapliga platsbeskrivande modellen finns beskrivningar av platsens geologiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska förhållanden.

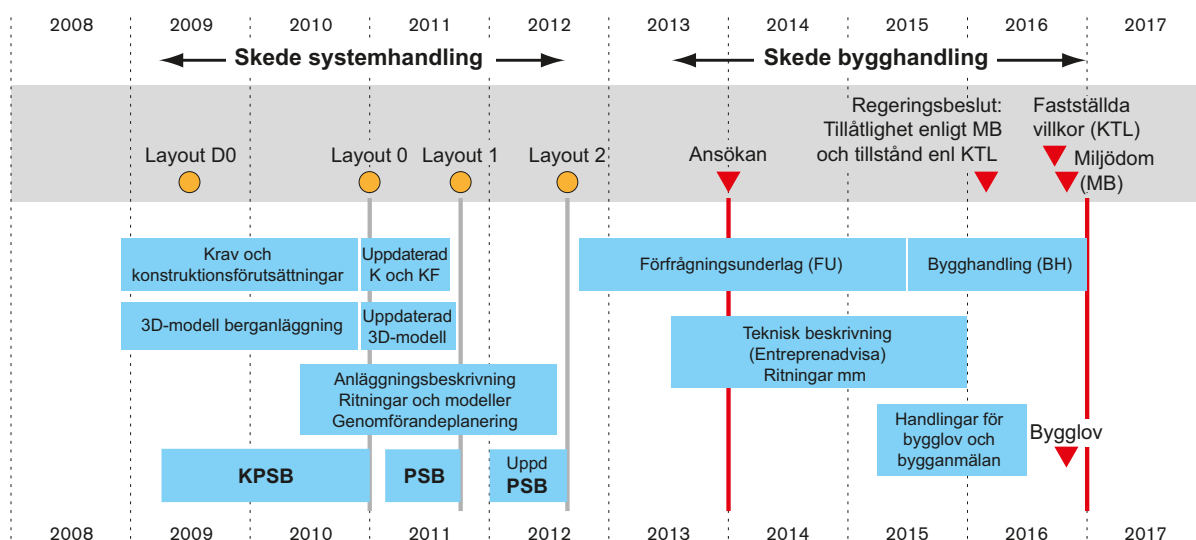
5.3.5 Arbetsmetodik för projektering

Anläggningsdelar

Anläggningsdelarna kan delas in i utrymmen under mark, byggnader ovan mark samt tekniska installationer. Placeringen av byggnader ovan mark är exempelvis beroende av placering av tunnel-påslag och eventuell utökning av ventilation. Information om vilka dimensioneringsförutsättningar som påverkar antalet bergutrymmen under mark finns i avsnitt 5.3.2.

Stegvis genomförande

Fram till byggstart sker projekteringen av SFR-utbyggnaden i två huvudskeden, skede systemhandling och skede bygghandling, se figur 5-5. Skede systemhandling är i sin tur nedbruten i ett antal layoutsteg med successivt framväxande mognadsgrad. I bygghandlingsskedet genomförs detaljprojektering av anläggningen med framtagande av förfrågningsunderlag och bygghandlingar.



Figur 5-5. Översiktlig struktur för framtagande av projekteringsunderlag. K och KF – Krav och konstruktionsförutsättningar. KPSB – Konceptuella preliminära systembeskrivningar. PSB – Preliminära systembeskrivningar.

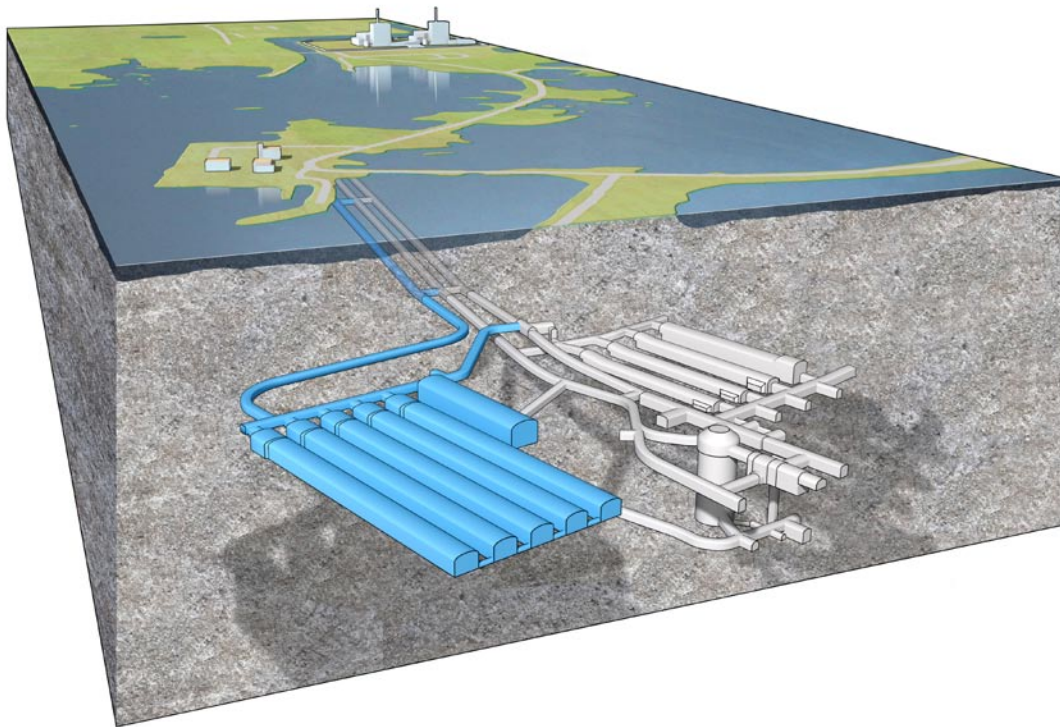
Layout D0 av SFR färdigställdes under sommaren 2009 och omfattar utbyggnadsalternativ där de befintliga bergutrymmenas tvärsnitt utgör referensutformning tillsammans med då gällande prognos avseende volym drift- och rivningsavfall, figur 5-6. Målet med layout D0 var att ta fram underlag för att kunna påbörja den platsspecifika utformningen av förvaret med hänsyn tagen till platsens geologiska och hydrogeologiska förutsättningar.

Layout 0 innebär en fördjupning av layout D0 och baseras bland annat på studier avseende preliminära krav och konstruktionsförutsättningar för installationer och utrustningar, till exempel ventilation, kraftmatning och brandsäkerhet, och dess eventuella påverkan på berggrummens utformning. Under tiden som arbetet med layout 0 pågår kommer data från platsundersökningar att bli tillgängliga och det blir möjligt att avgöra byggbarhet och lämplig position baserat på bergmassans geologiska och hydrogeologiska förutsättningar. Förhoppningen är att kunna fastställa utbyggnadens läge i layout 0, men om detta inte är möjligt ska åtminstone det område inom vilket utbyggnaden kan placeras klargöras och fastställas.

Utifrån krav och konstruktionsförutsättningar för layout 0, där uppdaterade avfallsprognoser ingår, tas en 3D-modell av en tänkbar utformning av anläggningen fram. Denna ligger sedan till grund för den hydrogeologiska modellering som ger förutsättningar för den långsiktiga säkerhetsanalysen. Fastställande av layout 0 innebär att överordnade krav och konstruktionsförutsättningar fastställs samt att konceptuella preliminära systembeskrivningar är framtagna.

Syftet med layout 1 är att slå fast de krav och konstruktionsförutsättningar som behövs för att kunna ta fram en anläggningsbeskrivning. I samband med layout 1 uppdateras också vid behov 3D-modellen över anläggningen. Preliminära systembeskrivningar tas fram som ska utgöra underlag för framtagning av Teknisk beskrivning enligt miljöbalken och kapitel 5 Anläggnings- och funktionsbeskrivning i PSAR Allmän del 1.

Fram till mitten av år 2012 pågår ett iterativt arbete mellan projektering, platsundersökning och analys av den långsiktiga säkerheten, innan utbyggnadens slutliga läge och utformning bekräftas och systemhandlingsskedet avslutas i och med fastställande av layout 2. Därefter, under bygghandlingsskedet, genomförs detaljprojektering av anläggningen med framtagande av förfrågningsunderlag, detaljerade tekniska beskrivningar för respektive entreprenad (berg, VVS, el, tele etc), ritningar, bygghandling samt handlingar för ansökan om bygglov. Byggstart planeras till början av år 2017.



Figur 5-6. SFR enligt layout D0, befintlig del (ljusgrå) och planerad del (blå). Observera att den slutgiltiga utformningen av utbyggnaden ännu inte är fastställd.

5.3.6 Säkerhetsredovisning

Innan en kärnteknisk anläggning får uppföras och innan större ombyggnader eller större ändringar av en befintlig anläggning genomförs ska en preliminär säkerhetsredovisning sammanställas enligt SSM:s föreskrift /5-6/. Den preliminära säkerhetsredovisningen för utbyggnaden av SFR kommer att bygga på anläggningens befintliga säkerhetsredovisning och förses med:

- uppgifter om avfallet som planeras att förvaras i anläggningen,
- uppgifter om anläggningens utformning efter utbyggnaden,
- uppgifter om planerat driftsätt inklusive driftgränser,
- beskrivningar av de säkerhetsanalyser och andra verifierande analyser som har gjorts av nya, planerade eller förändrade delar eller funktioner av anläggningen samt av sådana delar av anläggningen som inte har ändrats men som påverkas av förändringarna,
- referenser till säkerhetsanalyser och andra verifierande analyser.

5.4 Teknikutveckling för slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

5.4.1 Barriärer

Den slutliga utformningen av utbyggnaden av SFR, exempelvis hur många bergsalar som ska byggas och deras placering i berget, är ännu inte fastställd. Största delen av det avfall som kommer att placeras i ett utbyggt SFR kommer att vara lågaktivt och bedöms kunna förvaras i förvarsdelar med barriärer som motsvarar dagens BLA. En mindre mängd avfall kommer att vara medelaktivt och behöva placeras i en förvarsdel med mer avancerade barriärer.

Teknikutveckling behövs således både för förvarsdelar för lågaktivt avfall och för medelaktivt avfall.

Program

Hur barriärerna i de utbyggda förvarsdelarna ska utformas kommer att utredas och funktionen hos barriärerna i den befintliga anläggningen kommer att utvärderas.

För det lågaktiva avfallet kommer teknikutvecklingen att utgå från förvarsutrymmen av samma typ som BLA. Utifrån drifterfarenheter och erfarenheter från den senaste säkerhetsanalysen, bland annat vad gäller möjligheten till återfyllnad, kommer förändringar av barriärerna i förvarsdelen och konditioneringen av avfallet att ses över.

För det medelaktiva avfallet behövs barriärer som begränsar vattenflödet genom avfallet, men som medger uttransport av gas som bildas. Begränsat vattenflöde genom avfallet kan uppnås genom:

- Hydraulisk bur i form av bergkross och betongkonstruktioner, så som i BMA.
- Bentonit och betongkonstruktioner, så som i dagens Silo.

Utvecklingsarbetet kommer att utgå från den kunskap och de erfarenheter som vi har av de olika utformningarna på förvarsutrymmena i det befintliga SFR. Fördelar och nackdelar med olika koncept kommer att utredas och med detta som underlag kommer utvecklingsinsatserna sedan att styras.

5.4.2 Förslutning

Den strategi för förslutning som utvärderades i säkerhetsanalysen från 2008 för SFR liknar den som använts i tidigare analyser. Den innebär att de olika förvaringsutrymmena återfylls på olika sätt och i olika omfattning: pluggar av betong och bentonit placeras i alla tunnlar som ansluter till förvaringsutrymmena, pluggar placeras på två nivåer i tillfartstunnlarna och att övriga tunnelsystem återfylls. SSM har i sin granskning av säkerhetsanalysen 2008 efterfrågat en mer entydig förslutningsstrategi.

Program

SKB avser att utveckla strategin för förslutning av den befintliga anläggningen samt att ta fram en strategi för den utbyggda delen av anläggningen. Till stor del kan förslutningsstrategin för de båda delarna överensstämma, men det går inte att utesluta att det kan finnas olika planer för befintligt och utbyggt SFR. Strategin ska vara så detaljerad att den kan utgöra ett underlag för säkerhetsanalysen som tas fram inför ansökan om att bygga ut SFR.

I arbetet ska erfarenheter från den senaste säkerhetsanalysen för SFR men också analysen för Kärnbränsleförvaret tas till vara.

För Kärnbränsleförvaret har en referensmetod för borrhållsförslutning tagits fram, se kapitel 14. Metoden kommer att utvärderas utifrån behovet för borrhållsförslutning för SFR, eventuellt kan metoden modifieras för det djup och de bergförhållanden som gäller för SFR.

5.5 Markförvar

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

SSM anser att det genom nu gällande villkor för befintliga markförvar, finns ett väl etablerat regelverk i Sverige som kärnkraftverksägarna och SKB kan utgå ifrån. Östhammars kommun tycker att behov av markförvar för rivningsavfall behöver utredas.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Frågan om slutförvaring av mycket lågaktivt och kortlivat radioaktivt avfall aktualiseras i samband med planeringen för utbyggnad av SFR. I kärnkraftsföretagens avvecklingsplaner ingår markförvaring av mycket lågaktivt och kortlivat rivningsavfall, som ett alternativ till slutförvaring i SFR. Denna kategori avfall utgör en stor volym, men innehåller endast en relativt liten del av den aktivitet som följer det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken. Normalt anses mycket lågaktivt avfall vara sådant som kan slutförvaras i enkla markförvar av den typ som finns vid kärnkraftverk och i Studsvik. För dessa markförvar är kärnkraftverken respektive SVAFO tillståndshavare och villkoren för deponering ges från fall till fall av SSM, då generellt tillämpbara föreskrifter för markförvaring saknas. Den föreskrift för friklassning av material, byggnader och mark som förväntas bli gällande inom en snar framtid, kan utgöra en god planeringsgrund då ett markförvar inrättas.

Till planeringen av utbyggnaden av SFR behöver kärnkraftsföretagen ta ställning till hur det mycket lågaktiva rivningsavfallet ska slutförvaras. I den aktuella planeringen räknar SKB med att allt material som inte friklassas ska deponeras i SKB:s anläggningar.

Mot bakgrund av de arbeten som SSM genomför beträffande föreskrifter för friklassning och markförvaring av mycket lågaktivt avfall och den praxis för friklassning som industrin arbetar fram, kan uppskattningar göras av vilka avfallsmängder som kan bli aktuella för markförvaring. SKB har tillsammans med kärnkraftsföretagen genomfört en förstudie för att belysa tänkbara möjligheter och konsekvenser av att förvara en del av rivningsavfallet i markförvar. Målet med förstudien är att redovisa tänkbara alternativ för markförvaring av mycket lågaktivt avfall från rivning av kärnkraftverk med principiell layout, uppskattning av möjliga avfallsmängder och aktivitetsinnehåll, lokalisering och kostnader.

Program

Utifrån de pågående rivningsstudierna som SKB bedriver i samarbete med kärnkraftsföretagen samt föreslagna föreskrifter för friklassning, kommer en uppskattning av både avfallsvolymer och aktivitetsinnehåll att göras för olika institutionella övervakningstider.

Förstudien som togs fram under första delen av år 2010 kommer att uppdateras under 2011, då samtliga blockspecifika rivningsstudier är klara.

Då studien är klar kommer en utvärdering att ske tillsammans med kärnkraftsföretagen för ett gemensamt inriktningsbeslut om hur dessa volymer ska hanteras i Loma-programmet. Blir markförvaring aktuellt för att ta hand om mycket lågaktivt och kortlivat radioaktivt avfall, måste utbyggnaden av SFR anpassas och konkreta planer för markförvaring tas fram.

6 Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall

Av SKB:s totalt tre planerade slutförvar för kärnavfall, Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), Slutförvaret för långlivat radioaktivt avfall (SFL) och Kärnbränsleförvaret, är SFL det förvar som planeras att tas i drift sist. Innan vi kan ta SFL i drift är det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom val av förvarskoncept och plats, undersökningar, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar, bygge etc. SKB planerar att ansöka om att få bygga SFL cirka år 2030 och att kunna ta det i drift cirka år 2045. SFL kommer att vara det minsta av de tre slutförvarerna med en beräknad deponeringsvolym på ungefär 10 000 m³.

I detta kapitel redovisar SKB sina planer och program för omhändertagande av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet. Kapitlet innehåller förutom en redovisning av mängder avfall och när i tiden de förväntas uppkomma, även redogörelser för SKB:s planer för val av förvarskoncept och barriärer i SFL, mellanlagring och konditionering av avfallet och säkerhetsanalyser. Dessutom presenteras det forskningsprogram som kommer att utgöra underlag för säkerhetsanalyserna.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

Planerna för det framtida SFL-arbetet beskrevs översiktligt i Fud-program 2007 med hänvisning till att Fud-program 2010 fokuserar på Loma-programmet.

SKI begärde att SKB i en komplettering av Fud-program 2007, skulle redovisa när i tiden det avfall uppkommer som är avsett för SFL, alternativa förvarsutformningar (med konstruktionsförutsättningar och säkerhetsfunktioner) samt innehåll och inriktning i de kommande säkerhetsanalyser som behövs för att kunna ta fram och verifiera acceptanskriterier för avfallet till SFL och innehållet i det forsknings- och utvecklingsprogram som behövs för att stödja kommande säkerhetsanalyser.

SSI önskade en samlad redovisning och motivering av strategin för att ta hand om allt långlivat avfall från drift och rivning och ett forsknings- och utvecklingsprogram för SFL som tar hänsyn till behovet av skyddsförmåga, strategi för lokalisering, behov av acceptanskriterier och riktlinjer för konditionering samt behov av mellanlagring.

I kompletteringen av Fud-program 2007 beskrev SKB planeringen för arbetet med SFL översiktligt och mer detaljerade planer utlovades till Fud-program 2010.

I granskningen av kompletteringen till Fud-program 2007 pekade SSM främst på fyra områden som SKB bör ta ökad hänsyn till i Fud-program 2010:

- Att SKB:s motivering av tidsplanen för uppförandet av SFL baseras på all i dag tillgänglig kunskap om befintligt avfall och om när i tiden ytterligare långlivat avfall uppkommer.
- Att SKB vinnlägger sig om att konkretisera sina planer på arbetet med förvarets utformning.
- Att SKB:s program både för förvarsutformning och säkerhetsanalys av SFL särskilt fokuserar på framtagande av acceptanskriterier för avfall.
- Att det forskningsprogram som SKB avser att bygga upp 2010–2013 behöver konkretiseras.

6.1 Långlivat radioaktivt avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utgörs huvudsakligen av fyra kategorier:

- Kraftigt neutronbestrålad hårdkomponenter. Avfallet uppkommer både vid underhåll och vid rivning av reaktorer.
- Styrstavar från BWR-reaktorer.
- Långlivat avfall från verksamheter i Studsvik samt från sjukvård, forskning och industri. Detta avfall uppkommer successivt och är inte knutet till driften av eller avvecklingen av kärnkraftverken.

- Historiskt avfall från forskning och utveckling inom de svenska kärnforskningsprogrammen. Detta avfall hanteras och mellanlagras av SVAFO.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 redovisade SKB vilka typer av avfall som utgör det långlivade låg- och medelaktiva avfallet samt hur detta avfall hanteras i dag.

SSI framförde i sin granskning att SKB bör visa vilka avfallsmängder som förväntas och när avfallet uppstår. Även i granskningen av kompletteringen av Fud-program 2007 menar SSM att SKB bör redovisa kunskap om befintligt avfall och om när i tiden ytterligare långlivat avfall uppkommer.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Behovet av deponeringsvolym i SFL har beräknats till 10 000 m³. Beräkningen baseras på volymen befintligt mellanlagrat avfall och en prognos för det framtida avfallet från drift och rivning av kärnkraftverken, se figur 6-1. Prognosen för mängden och behovet av deponeringsvolym för framtida avfall bygger på följande antaganden:

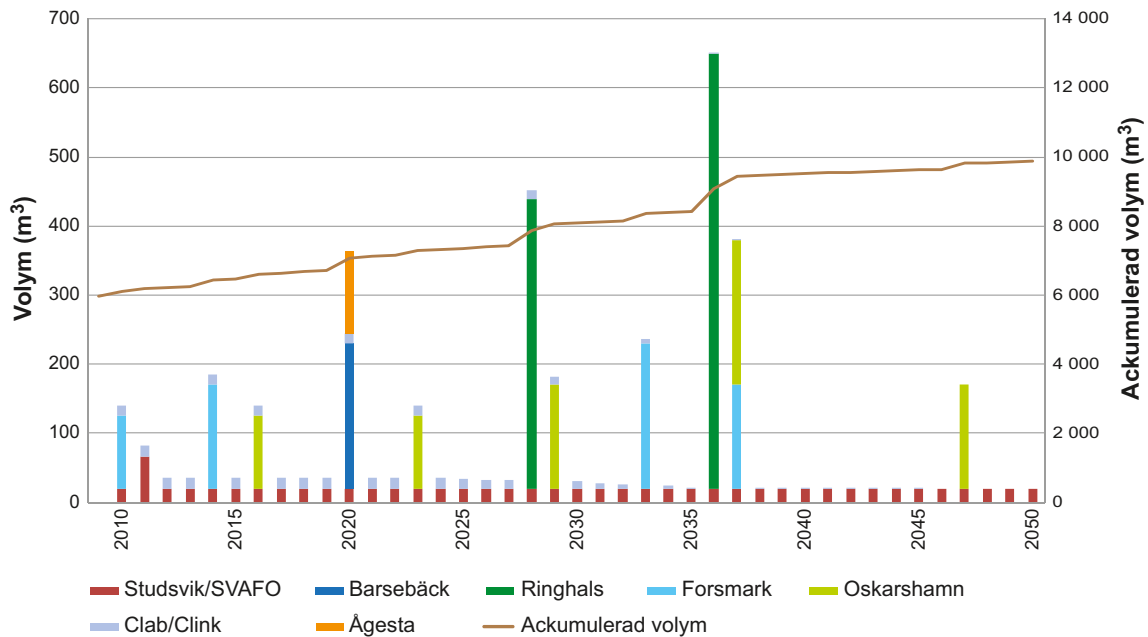
- Samtliga neutronaktiverade hårdkomponenter i BWR ersätts efter 20–25 års drift. För en driftperiod av kärnkraftverken på 50 respektive 60 år har därför ett respektive två byten antagits.
- Styrstavarna i BWR byts efter 15–20 år och efter avslutad drift av befintliga kärnkraftverk beräknas det totala antalet styrstavar vara cirka 2 500 stycken.
- En uppsättning hårdkomponenter från en BWR uppskattas väga i genomsnitt 70 000 kg vilket motsvarar en deponeringsvolym på cirka 100 m³.
- Inga byten av hårdkomponenter i PWR.
- Styrstavar från PWR slutförvaras tillsammans med det använda kärnbränslet.
- Hårdkomponenterna i en PWR uppskattas väga i genomsnitt 35 000 kg vilket motsvarar en deponeringsvolym på cirka 50 m³.
- Alla hårdkomponenter sönderdelas och placeras i BFA-tankar, som har en deponeringsvolym på 9,9 m³ och en lastkapacitet på maximalt 12 ton.
- BFA-tankarna lastas med i genomsnitt 6,6 ton avfall vilket motsvarar 1,1 ton per m³ inre volym.

Det i dag mellanlagrade avfallet, som i huvudsak utgörs av historiskt avfall, behöver en deponeringsvolym på cirka 6 000 m³, se tabell 6-1. Denna uppskattning skiljer sig från det referensinventarium som användes i säkerhetsanalysen år 1999, då det historiska avfallet uppskattades till 1 800 m³. Den stora skillnaden mellan uppskattningarna förklaras till stor del av att SVAFO står i begrepp att placera de betongfyllda avfallsfaten i större fat för att åstadkomma en säkrare hantering och mellanlagring. Dessutom har avfall som tidigare bedömdes kunna slutförvaras i SFR överförts till SFL.

Programmet för arbetet med det långlivade låg- och medelaktiva avfallet redovisas i avsnitt 6.3.

Tabell 6-1. Vikt på befintligt avfall i olika mellanlager samt prognos för behov av deponeringsvolym i SFL (år 2009).

Mellanlager	Vikt avfall (kg)	Uppskattat behov av deponeringsvolym (m ³)
Barsebäck i bassänger	54 616	80
Ringhals i bassänger	12 330	20
Oskarshamn i bassänger	1 410	10
Oskarshamn i kollin	87 600	420
Forsmark i bassänger	75 100	100
Clab i bassänger	135 633	200
SVAFO		4 630
Studsvik		450
Totalt	366 689	5 910



Figur 6-1. Översiktlig tidsplan för uppkomsten av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Staplarna visar den volym avfall som uppstår under ett år och läses av på den vänstra axeln. Kurvan visar den ackumulerade volymen och läses av på den högra axeln. Information om det befintliga avfallet redovisas mer detaljerat i tabell 6-1.

6.2 Mellanlager för långlivat avfall

Långlivat avfall mellanlagras i dag antingen i Clabs bassänger, i kraftverkens egna förvaringsbassänger eller torrt i behållare i olika mellanlager.

Historiskt avfall hanteras av SVAFO och mellanlagras liksom avfall från Studsviks verksamhet i mellanlager på Studsviks område.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 redovisades planerna för utökad torr mellanlagring av härdkomponenter i BFA liksom Forsmarks planer på att bygga ett eget mellanlager.

SSI framförde i sin granskning att SKB bör visa hur behovet av mellanlagring av det långlivade avfallet kommer att tillgodoses.

I kompletteringen till Fud-program 2007 beskrevs planerna för mellanlagring av långlivat avfall i BFA, men även möjligheterna att eventuellt mellanlagra långlivat avfall i den framtida utbyggnaden av SFR. SKB beskrev vidare fördelarna med den bibehållna handlingsfrihet som medges genom att mellanlagra avfallet utan att konditionera det irreversibelt.

I granskningen av kompletteringen av Fud-program 2007 skriver SSM att ”den konditionering (irreversibel eller ej) som görs innan acceptanskriterierna slutligen fastställts ändå bör ske på ett ändamålsenligt sätt med hänsyn till säkerhet och strålskydd i alla kommande hanteringsteg”. SKB tolkar detta utlåtande som att SSM accepterar SKB:s strategi att fortsätta mellanlagra det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utan att slutbehandla det, till dess att SFL tagits i drift.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Det totala behovet av utrymme i mellanlager är cirka 10 000 m³ under förutsättningen att allt långlivat låg- och medelaktivt avfall mellanlagras innan SFL tas i drift. Av denna volym hanteras ungefär hälften internt av Studsvik och SVAFO och berör därför inte kärnkraftverkens planering.

Ovanstående data kan jämföras med de i dag befintliga mellanlagren (förvarsbassänger på kärnkraftverken och i Clab ej inräknade) vilka har följande kapaciteter:

- BFA – Bergrum för avfall (Oskarshamn) 13 500 m³
- Mellanlager Forsmark 550 m³
- Mellanlager Ringhals 9 200 m³
- SVAFO och Studsvik mellanlager 2 000 m³
- SVAFO och Studsvik bergrum 5 000 m³

De ovan angivna volymerna är i dag inte till fullo tillgängliga för SFL-avfall eftersom de också utnyttjas för mellanlagring av annat avfall. SKB planerar att ansöka om att få mellanlagra långlivat avfall i SFR. Genom att mellanlagra långlivat avfall i SFR säkerställer vi att det finns mellanlagringsutrymme både före och efter att kärnkraftverken avvecklats och anläggningsområdena används för andra ändamål.

En särställning vad gäller behov av mellanlagringsutrymme har Ringhals PWR-reaktortankar. Diskussionen i avsnitt 6.1 förutsätter att dessa hanteras i sönderdelat skick placerade i behållare, men framtida önskemål kan innebära att dessa kan komma att hanteras i ett stycke.

Program

För att säkerställa hantering och mellanlagring av avfall som ska till SFL genomför och planerar SKB ett antal utredningar vilka beskrivs nedan.

Utredning om mellanlagring av långlivat avfall i SFR-utbyggnaden

SKB har inlett en utredning som ska ligga till grund för planeringen av ett mellanlager för långlivat avfall från kärnkraftverken i det utbyggda SFR. Utredningen behandlar förutsättningarna för och konstruktionskraven på ett sådant mellanlager. Studien ska bland annat ge krav på lyfthöjd, strålskydd, avställning och intranport. Dessutom behöver vi säkerställa att vi kan öppna BFA-tankarna efter en lång tids mellanlagring. SKB behöver ta fram en handlingsplan för hur en BFA-tank som inte enkelt kan avlockas ska öppnas.

Utveckling av transportbehållare för BFA-tankar

För att transportera långlivat avfall som placerats i BFA-tankar krävs en transportbehållare av typen B. Utveckling av en behållare (ATB 1T) för transport av en BFA-tank i taget med en maximal ytdosrat på 200 mSv/h har därför inletts. Målet är att behållaren ska vara licensierad och färdig att tas i drift år 2015. I samband med detta arbete har acceptanskriterier för avfall i BFA-tankar tagits fram och förts in i SKB:s avfallshandbok.

Utveckling av hanteringsutrustning för BFA-tankar

Inom SKB pågår arbete med syfte att utveckla hanteringsutrustning för BFA-tankar och transportbehållaren ATB 1T. Exempel är de utrustningar som behövs för packning av BFA-tankar och överföring av BFA-tanken till transportbehållaren.

Merparten av komponenterna till hanteringsutrustningen har redan levererats till FKA och provats under januari–februari 2010. Arbete med kontroll- och konstruktionsdokumentation pågår och kommer att avslutas under år 2011.

Utrednings- och offertarbete pågår för transportbehållare för kontaminerad hanteringsutrustning. Efter beslut om teknik och finansiering kan behållarna troligen levereras under år 2011. Arbetet i sin helhet förväntas kunna avslutas under 2011.

6.3 Slutförvar för långlivat avfall

SKB har delat in arbetet med slutförvaret för långlivat avfall (SFL) i två huvudperioder, en kortsiktig som sträcker sig fram till och med den första säkerhetsanalysen år 2016 och en långsiktig som sträcker sig från 2016 till 2045 då anläggningen ska tas i drift. En översiktlig tidsplan för detta arbete presenteras i figur 6-2. Flera viktiga milstolpar måste passeras, såsom val av förvarskoncept och plats, undersökningar, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar etc. Enligt tidsplanen planerar vi att ansöka om att få uppföra förvaret cirka år 2030 vilket med hänsyn taget till osäkerheter etc bedöms vara en realistisk tidpunkt under förutsättning att vi kan förlägga förvaret på en plats som SKB tidigare har god kännedom om. Tiden från ansökningar till att ta förvaret i drift är mer osäker eftersom den omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid.

6.3.1 Övergripande planering och redovisningar

I detta avsnitt beskrivs planeringen av arbetet för perioden 2011–2016 detaljerat och den långsiktiga planeringen beskrivs översiktligt. Den kortsiktiga planeringen delas in i två perioder, 2011–2013 samt 2014–2016, vilka redovisas separat nedan.

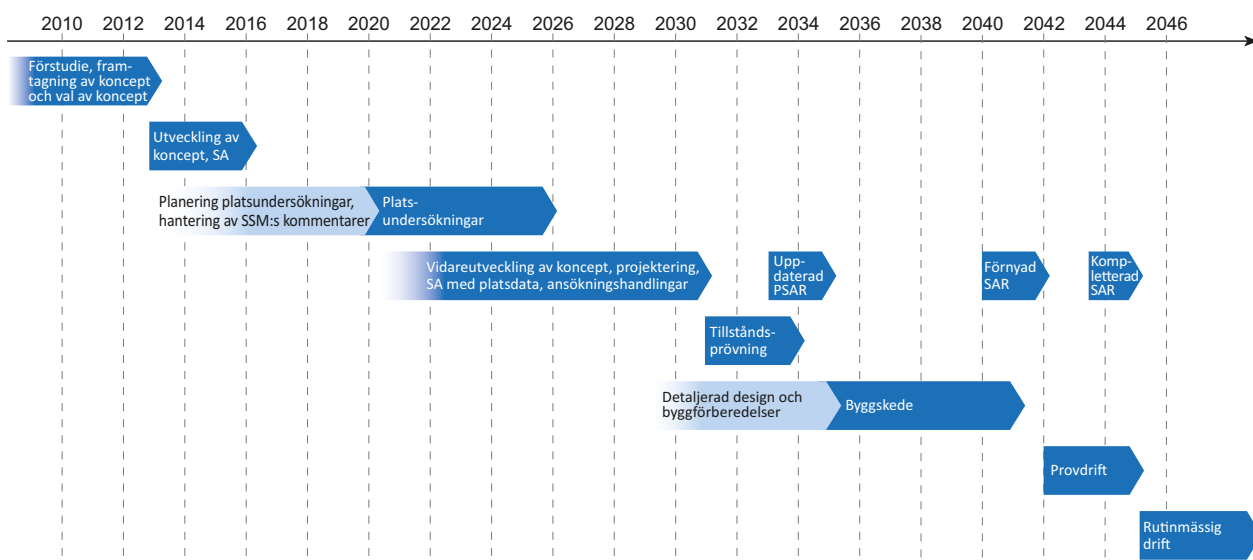
Perioden 2011–2013

Fokus för arbetet med SFL under perioden 2010–2013 är en konceptstudie som underlag till valet av förvarskoncept. Syftet med konceptstudien är att genomföra en första sällning bland möjliga förvarskoncept och att ett eller flera för SFL lämpliga förvarskoncept kan identifieras. Dessa kan sedan utvärderas i den säkerhetsanalys som ska redovisas år 2016.

Dessutom ska det grundläggande arbete som behövs för redovisningen av en säkerhetsanalys år 2016 påbörjas. Som exempel kan nämnas uppdatering av referensinventariet samt planering och uppstart av olika forsknings- och utvecklingsprojekt. Detaljerade beskrivningar av det arbete som planeras återfinns i avsnitten 6.3.2, 6.3.3 samt 6.3.4.

Perioden 2014–2016

Under perioden 2014–2016 kommer fokus för arbetet med SFL främst att vara den säkerhetsanalys (SA) som ska redovisas under år 2016.



Figur 6-2. Uppskattad tidsplan för arbetet inför driftsättningen av SFL. Arbetet delas in i olika faser: Framtagning, val och utveckling av förvarskoncept, platsundersökningar och framtagning av ansökningshandlingarna utgör de första faserna. Därefter följer tillståndsprövningen, själva utbyggnaden och överlämningen av anläggningen till driftorganisationen.

Viktiga underlag till säkerhetsanalysen är konceptstudien som redovisas år 2013, det uppdaterade referensinventariet samt resultat från genomförda forskningsprojekt för SFL eller andra förvar. Platsdata kommer att hämtas från de generiska platser som användes i den förra säkerhetsanalysen för SFL, alternativt från de inom Kärnbränsleprogrammet genomförda platsundersökningarna.

Acceptanskriterier för konditionerat avfall som ska till SFL kommer att kunna tas fram först när beslut har fattats om förvarskoncept. Innan ett verifierat förvarskoncept finns är det inte lämpligt att kärnkraftverken påbörjar slutlig konditionering av avfall. Acceptanskriterier för avfallet som ska mellanlagras finns, se avsnitt 6.2.

Perioden 2016–2045

Planeringen av SFL-arbetet efter år 2016 presenteras översiktligt i figur 6-2, där huvudaktiviteterna finns markerade.

Inför platsundersökningarna kommer en lokaliseringstudie att genomföras. Platsundersökningar beräknas kunna påbörjas kring år 2020. Därefter kommer projektering av anläggningen och analys av förvarets långsiktiga säkerhet att genomföras, baserade på information från den valda platsen.

6.3.2 Uppdatering av referensinventariet

Under de senaste åren har avfallsströmmarna till SFL förändrats bland annat i och med besluten om förlängda drifttider för både kärnkraftverken och för SFR. SKB planerar därför att ta fram och redovisa ett uppdaterat referensinventarium till år 2013.

Program

Uppdateringen av referensinventariet kommer att ske i nära samarbete med kärnkraftsföretagen, SVAFO, Studsvik och övriga intressenter. I SFL kommer följande avfall att slutförvaras:

Historiskt avfall

Det historiska avfallet hanteras av SVAFO som år 2009 inledde en kompletterande karakterisering av det betongingjutna avfallet, vilken förväntas vara klar under våren 2011. Syftet är att beskriva avfallet som finns mellanlagrat och uppskatta innehållet av radionuklider. Arbetet omfattar också att identifiera de fat som innehåller större mängder vätskor eller andra material som kan orsaka problem i ett slutförvar samt att genomföra beräkningar för hur eventuella behov av omkonditionering av avfallet kommer att påverka deponeringsvolymen.

Avfall från Studsviks verksamhet

Studsviks verksamhet producerar årligen avfall motsvarande en deponeringsvolym på cirka 20 m³. Avfallet består till största delen av aska och slam som lagras i plåtfat. Information om detta avfall lagras i en databas. SKB:s huvudsakliga uppgift är att säkerställa att relevant information samlas in och sammanställs så att den är tillgänglig för SKB.

Avfall från rivning av kärnkraftverken

Rivningsstudier pågår för att kartlägga avfallet från rivningen av kärnkraftverken med avseende på material, vikt, deponeringsvolym och radionuklidinnehåll. En uppskattning av behovet av deponeringsvolym samt tidpunkter för när avfallet uppkommer redovisas i figur 6-1. Rivningsstudien för Barsebäck är färdig och de övriga förväntas bli klara under år 2011.

En utförlig beskrivning av planerna för avveckling och rivning av kärnkraftverken finns i avsnitt 7.2.

Avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken

En inventering av det avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken som i dag finns mellanlagrat kommer att genomföras. Information om detta avfall finns lagrad i databaser hos kärnkraftverken och SKB. Den huvudsakliga uppgiften för SKB är att säkerställa att informationen är korrekt och fullständig vad gäller materialsammansättning och radionuklidinnehåll.

Dessutom ska prognoserna för vilka avfallsvolymer som framtida underhållsarbete kommer att generera uppdateras, genom att klargöra kraftverkens planering av större underhållsinsatser. Därefter kommer prognoser för behovet av deponeringsvolym att tas fram och nuklidinventarium att beräknas och sammanställas.

6.3.3 Förvarskoncept

I den säkerhetsanalys för SFL som SKB presenterade år 1999 /6-1/ användes ett BMA-liknande förvar på cirka 300 meters djup. Härdkomponenterna var placerade i långkokiller av armerad betong med en inre stålkassett. Förvarets tekniska barriärer utgjordes av betong och porös betong. Bergutrymmena var återfyllda med bergkross.

Säkerhetsanalysen visade att förbättrade tekniska barriärer behövde utvecklas.

Program

Under år 2011 inleds arbetet med att identifiera möjliga förvarskoncept för SFL. Arbetet kommer i huvudsak följa den metodik som SKB använt tidigare för slutförvaret för använt kärnbränsle /6-2/ vilken omfattar:

- identifiering av förvarskoncept,
- identifiering och val av urvalsmetod och kriterier för urval,
- utvärdering och val av förvarskoncept,
- utveckling och förbättring av valda förvarskoncept,
- säkerhetsanalyser och val av ett förvarskoncept.

Arbetet med förvarskonceptet omfattar bland annat val av metoder och tekniska lösningar för:

- konditionering av avfall,
- avfallskollin,
- barriärer och konstruktionsmaterial,
- förslutning.

De tekniska lösningarna utgör, tillsammans med valet av plats och förvarsdjup, det fullständiga förvarskonceptet. Nedan följer en redogörelse för de avgränsningar och egenskaper som SKB har tagit hänsyn till vid utformning av de olika förvarskoncepten. Det förvarskoncept som utvärderades i säkerhetsanalysen år 1999 kommer att ingå i konceptstudien och användas som referens för att utvärdera konceptens långsiktiga säkerhet.

Det avfall som SKB kommer att deponera i SFL utgörs av material med olika egenskaper. Det innebär att förvaret, trots sin begränsade volym, kan komma att bestå av flera förvarsutrymmen baserade på olika tekniska lösningar.

Avfallskolli och konditionering av avfall

Vid val av avfallskolli och konditioneringsmetod för det långlivade avfallet måste hänsyn tas till avfallens ursprung, sammansättning, nuklidinnehåll, strålningsnivå samt om det redan genomgått någon form av behandling eller konditionering. Utöver detta bör hänsyn även tas till förekomst av komplexbildare och andra kemiska ämnen som kan påverka förvarets långsiktiga säkerhet.

Informationen om avfallet varierar. Det historiska avfallet är i dag ingjutet i betong, men sammansättning och egenskaper är till vissa delar inte kända. Det metalliska avfallet från kärnkraftverken kommer att vara väl karakteriserat. SKB förutser att helt olika metoder för slutkonditionering och olika typer avfallskollin kommer att behövas för de olika avfallstyperna.

För det historiska avfallet finns färre frihetsgrader vid val av slutkonditioneringsmetod än för det metalliska rivningsavfallet. En möjlig metod är att behållarna placeras i en yttre behållare för att förstärka förpackningens egenskaper. Denna behållare behöver inte nödvändigtvis vara densamma som den som beskrevs i avsnitt 6.1. För det metalliska avfallet är frihetsgraderna fler. Detta avfall kommer att till stor del mellanlagras i stålbehållare, så kallade BFA-tankar, innan det ska deponeras. Möjliga alternativ är därför att låta avfallet ligga kvar i tankarna och deponera dessa eller att fylla dem med betong före deponeringen. Om avfallet mellanlagras under lång tid medger det fler möjligheter för konditionering som skulle kunna ge säkerhetsmässiga fördelar under ett slutförvaringsskede.

Barriärer och konstruktionsmaterial

Tillsammans med konditioneringsmetod och avfallskolli utgör förvarets tekniska barriärer och det omgivande berget, skyddet mot spridning av radionuklider. Valet av förvarets tekniska barriärer måste göras med hänsyn till avfallet och hur detta konditioneras samt de behållare som avfallet placeras i.

En utgångspunkt för SFL är att den huvudsakliga säkerhetsfunktionen för förvaret är att fördröja utsläpp av radioaktiva ämnen, vilket även gäller för SFR. Detta åstadkoms i huvudsak genom barriärernas förmåga att begränsa transporten av grundvatten och förmågan att sorbera radionuklider.

SFL kommer att innehålla stora mängder metalliskt avfall och frigörelsen av radionuklider är därför beroende av att korrosionsprocesser kan fortgå. Barriärernas förmåga att begränsa detta är därför av intresse, till exempel genom att begränsa tillgången på vatten.

Andra egenskaper att ta hänsyn till vid val av förvarets barriärer är att de ska vara mekaniskt och kemiskt stabila över mycket långa tidsperioder samt ha förmåga att motstå en eventuell frysning under en permafrostperiod.

Förslutning

SKB står i dagsläget i begrepp att inleda en studie av metoder och material för förslutning av SFR, se avsnitt 5.4.2. När denna studie har genomförts kan den ge underlag för att klarställa hur en förslutning av SFL ska utformas. Dessutom har vi en referensutformning för förslutningen av Kärnbränsleförvaret vilken också utgör ett underlag.

6.3.4 Naturvetenskaplig forskning

Ett detaljerat vetenskapligt underlag kommer att behövas inför framtida säkerhetsanalyser av SFL. SKB har under de senaste decennierna bedrivit forskning och utveckling för SFR och Kärnbränsleförvaret. Den samlade kunskapen kommer att vara användbar även i arbetet med säkerhetsanalyser för SFL.

I detta avsnitt beskrivs planerna för de forskningsområden som har tydligast koppling till SFL. Övrig forskning som bedrivs eller planeras i SKB:s regi och som är relevant för SFL beskrivs i avsnitt 20.2 och 21.2 samt i kapitel 25 och 26.

Program

Under år 2009 och 2010 har en sammanställning av kunskapsläget om för SFL viktiga forskningsområden genomförts, liksom en översiktlig genomgång av möjliga tekniska koncept. Underlaget ska användas för att fatta beslut om vilka forskningsprojekt som ska startas upp under kommande treårsperiod. Ett antal forskningsprojekt är identifierade och några har redan startat, främst inom områden kopplade till de tekniska barriärernas och avfallets egenskaper.

Inom SKB pågår en regelbunden inventering av forskningsläget vilket leder till att nya forskningsprojekt direkt riktade mot SFL initieras och genomförs i samarbete med andra projekt inom SKB eller genom medverkan i nationella eller internationella forskningsprogram.

Nedan följer en beskrivning av några av de områden som identifierats som viktiga för SFL och inom vilka ett eller flera projekt inletts under 2009 och 2010 och som kommer att pågå under flera år.

Åldersförändringar hos cementbaserade material

Cement är inte ett statiskt och homogent material utan det förändras med tiden genom processer som karbonatisering och urlakning av pH-höjande hydroxider som NaOH och Ca(OH)₂. Dessa processer leder till att materialstrukturen förändras, liksom de kemiska och mekaniska egenskaperna genom att vissa faser löses upp medan andra bildas.

Det är viktigt att cement- och betongkonstruktionernas förmåga att begränsa vattengenomströmning är intakta så länge som möjligt efter förslutning av förvaret för att begränsa urlakning av konstruktionerna, korrosion av metaller samt uttransport av radionuklider. Den senare är dessutom beroende av cementens förmåga att sorbera radionuklider och därmed bidra till förvarets utsläppsfördröjande egenskaper.

De kemiska och mekaniska egenskaperna hos färsk cement är i dag relativt välkända. För åldrad cement, det vill säga cement äldre än 100 år, är kunskapsläget däremot sämre.

För att studera de processer som är involverade i åldrandet och de effekter dessa har på cementens kemiska och mekaniska egenskaper har ett antal forskningsprojekt inletts. Huvudsyftet med dessa studier är att öka kunskapen inom områden som kopplar till åldring av cementbaserade material och dess interaktioner med omkringliggande material, både genom realtidsundersökningar i förvarsmiljö och accelererade experiment i laboratoriemiljö samt slutligen genom datormodelleringar.

Korrosion av metaller i förvarsmiljö

Frigörelsehastigheten av radionuklider från metalliskt avfall liksom livslängden hos metalliska avfallsbehållare och armerad betong är till stor del beroende av korrosionshastigheten för de aktuella metallerna i förvarsmiljö. Tidpunkten för när materialen börjar korrodera, hastigheten, mekanismerna och omfattningen av korrosionsprocesserna är helt beroende av vilken metall det rör sig om och egenskaperna hos omgivningen. För en utförligare beskrivning av korrosionsprocessen hänvisas till avsnitt 20.2.12.

Metall i form av armeringsjärn, avfallsbehållare och avfall utgör en stor andel av det material som kommer att finnas i SFL, vilket medför att ett viktigt underlag för framtida säkerhetsanalyser kommer att utgöras av förståelsen för korrosionsprocesserna. Ett projekt har därför inletts där olika typer av metall gjutits in i cement och placerats i borrhål i förvarsmiljö i Äspölaboratoriet. Ett första återtag av detta material för undersökning av hur det påverkats är planerat kring år 2020 och ett sista så sent som tillåts av öppethållandet av laboratoriet.

Som komplement till dessa studier planerar SKB att genomföra motsvarande undersökningar i laboratoriemiljö. Planer finns även på att genomföra studier av korrosionsprocessen i realtid genom mätningar av hastigheten på den pågående korrosionsprocessen med olika metoder.

Nedbrytning av organiskt avfall i cementmiljö

Kemisk degradering av organiskt material i avfallet, eller i den matris som avfallet kan vara ingjutet i, kan generera produkter som kan påverka förvarets långsiktiga säkerhet, till exempel komplexbildare. Organiskt material förväntas förekomma både i det historiska avfallet och som tillsatsmedel i cement och betong. För en utförligare beskrivning av denna process och dess effekter hänvisas till avsnitt 20.2.10.

Nedbrytningsprodukterna kan påverka hastigheten med vilken radioaktiva nuklider transporteras ut ur förvaret och en god kännedom om vilka nedbrytningsprodukter som olika organiska material kan ge upphov till, utgör därför ett viktigt underlag till framtida säkerhetsanalyser. Informationen

är också viktig för att begränsa avfallets innehåll av material som ger upphov till särskilt kritiska nedbrytningsprodukter.

Ett projekt har inletts där olika typer av organiskt avfall gjutits in i cement och placerats i borrhål i förvarsmiljö i Äspölaboratoriet. Ett första återtag av detta material för undersökning av hur det påverkats av denna exponering är planerat kring år 2020 och ett sista så sent som tillåts av öppet-hållandet av laboratoriet.

Som ett komplement till dessa studier planerar SKB att genomföra motsvarande undersökningar i laboratoriemiljö. Innan fortsatt experimentell verksamhet genomförs kommer en mer genomgripande kartläggning av kunskapsläget inom detta område att genomföras.

Gaspermeabilitet hos betong och cement

Förvarets förmåga att släppa ut bildade gaser är viktig eftersom alltför gastäta konstruktioner och material kan leda till höga övertryck vilket skulle kunna försämma säkerheten. För en utförligare beskrivning av gastransport hänvisas till avsnitt 21.2.5.

I förvaret kommer gas att bildas i huvudsak genom anaerob korrosion av metaller, men ett visst bidrag förväntas även från nedbrytning av organiskt avfall. Eftersom dessa processer förväntas pågå under lång tid har SKB initierat ett projekt för att utreda hur gaspermeabiliteten i cement utvecklas i ett långtidsperspektiv och vilka egenskaper hos cementen som styr denna process. En förstudie beräknas vara klar under år 2010 och därefter kommer beslut fattas om projektets fortsatta inriktning.

7 Ansvar, planering och teknik för avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar

Enligt Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet 12 § ska den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnkraftsreaktor i samråd med övriga reaktorinnehavare upprätta eller låta upprätta ett program för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som anges i 10 § 2 och 3 och 11 §. Detta program ska också innefatta avveckling och rivning.

I detta kapitel redovisas hur ansvaret för avveckling och rivning av kärnkraftsreaktorerna har fördelats mellan tillståndshavarna och SKB. Vi redovisar också planeringen för hur avvecklingen av reaktorerna och SKB:s egna kärntekniska anläggningar ska genomföras. Vidare redovisas hur samarbete bedrivs nationellt och internationellt för att öka kompetensen inom avvecklingsarbetet.

Avveckling av en kärnteknisk anläggning utgör den verksamhet som pågår under tidsperioden från det att anläggningen permanent har ställts av tills dess att den är radiologiskt friklassad och undantagen från villkor enligt kärntekniklagen. Därefter finns inga radiologiska eller kärnsäkerhetsmässiga skäl som förhindrar etablering av annan verksamhet på platsen. Rivningen av en anläggning är en del av avvecklingen och omfattar den verksamhet som pågår från att den faktiska rivningen startar tills hela anläggningen är friklassad.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och dess granskning

SSM anser att sammanställningen av kärnkraftsföretagens avvecklingsplaner och SKB:s planering behöver utvecklas och kompletteras i Fud-program 2010. Detta gäller även avvecklingsplanen för Ågesta kraftvärmeverk. Fud-program 2010 bör innehålla en redogörelse för vilket mandat som givits SKB att planera och/eller genomföra åtgärder som ingår i kärnkraftsföretagens skyldigheter enligt kärntekniklagen.

SSM har i sina kommentarer till kompletteringen av Fud-program 2007 och inför arbetet med Fud-program 2010 påtalat att de saknar en komplett bild av ansvarsfördelningen mellan SKB och tillståndshavarna för de svenska kärnkraftsreaktorerna. Det mandat som getts SKB av tillståndshavarna behöver förtydligas. Det behövs en redovisning angående ansvaret för planering och genomförande av de ingående faserna i avvecklingen.

När det gäller regler för friklassning anser SSM att SKB och kärnkraftsföretagen kan utgå från EU:s rekommendationer på området, vilka SSM avser att införa i kommande föreskrifter för friklassning.

SSM har vid samordningsmöten inför Fud-program 2010 efterfrågat en översiktlig beskrivning av kärnkraftverkens planering av rivning, slutförvaring och friklassning. Vad för avfall som uppstår och när, samt hur det ska omhändertas, liksom en redovisning av planernas flexibilitet utifrån förändringar i kraftverkens planer. Dessutom ska kopplingarna till SKB:s planer beskrivas.

7.1 Ansvarsfördelning

Tillståndshavarna för de kärntekniska anläggningarna i Sverige har, enligt Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet, ansvar för att på ett säkert sätt avveckla och riva de radioaktiva delarna av anläggningarna. Avvecklingen ska redovisas i planer där detaljeringsgraden på redovisningen ökar när anläggningen närmar sig avvecklingsperioden. Vidare anges i Finansieringslagen (2006:647) att en tillståndsinnehavare ska beräkna den uppskattade kostnaden för avveckling och rivning av kärnkraftverk.

För avvecklingen och rivningen av de svenska kärnkraftsreaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals har tillståndshavarna Barsebäck Kraft AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktieföretag respektive Ringhals AB ansvaret. För Ågesta kraftvärmereaktor ansvarar Vattenfall AB medan SKB ansvarar för sina anläggningar; Clink, SFR, Kärnbränsleförvaret och SFL.

Tillståndshavaren har ansvaret för avfallet tills det är friklassat eller tills SSM har fattat beslut om förslutning av aktuellt slutförvar, och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt 10 § kärntekniklagen.

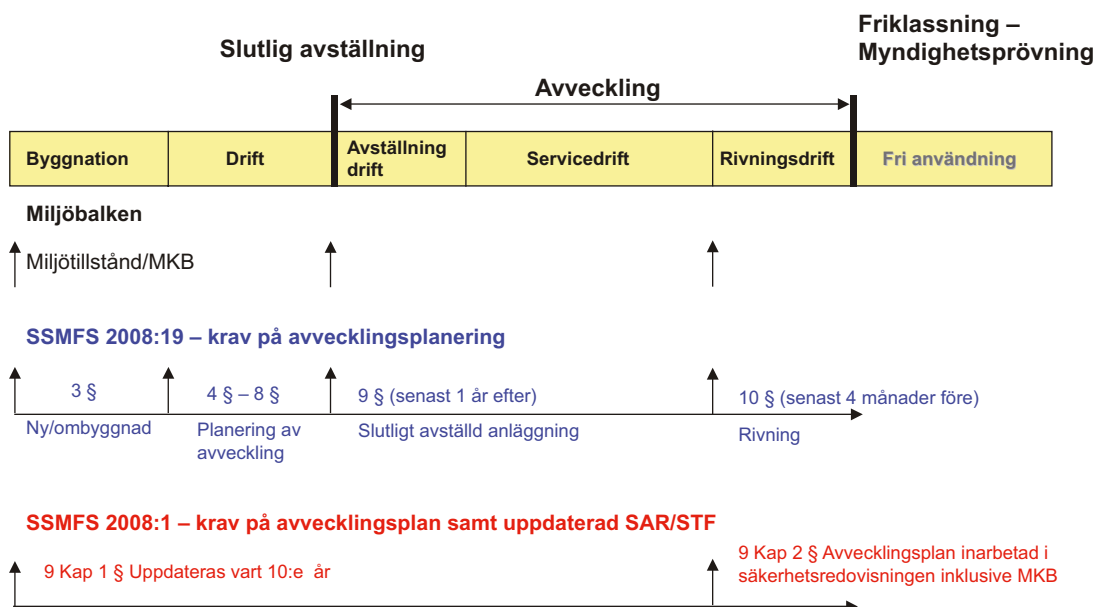
Figur 7-1 visar en översikt av myndighetskrav på avvecklingsplanering under ett kärnkraftverks livslängd. Efter att anläggningen har ställts av påbörjas avvecklingen vilken sträcker sig fram tills att anläggningen kan friklassas. Avveckling omfattar avställningsdrift, servicedrift och rivningsdrift. Avställningsdrift är verksamheten från det att blocket ställts av slutgiltigt tills allt bränslet avlägsnats från anläggningen och transporterats bort. Därefter inleds servicedriften som varar fram till och med att den fysiska rivningen påbörjas. Under rivningsdriften pågår den fysiska rivningen av anläggningen och övriga aktiviteter som erfordras för att friklassning ska kunna uppnås. Efter beslut från SSM om friklassning, kan myndigheten avföra anläggningen från kärntekniklagen.

Enligt miljöbalken ska en MKB lämnas in både innan slutlig avställning av anläggningen och som en del i ansökan om att få utföra själva rivningen, se figur 7-1.

För att uppfylla SSMFS 2008:19 ska strålskyddsaspekter vid en framtida avveckling beaktas då en anläggning byggs. Föreskriften reglerar också planeringen av avvecklingen, § 4–8 som ställer krav på att det finns en preliminär plan. Senast ett år efter den slutliga avställningen ska tillståndshavaren överskådligt redovisa och motivera mål och åtgärder samt presentera en tidsplan för avvecklingen. Senast fyra månader innan rivningsdriften påbörjas ska en detaljerad redovisning skickas till SSM som beskriver hur arbetet ska bedrivas. Redovisningen ska omfatta bland annat hur olika system berörs, organisation, beredskapsplaner, materialmängder, behandling av avfallet, hantering av kvarvarande radioaktivitet i mark eller byggnader, kvalitets- och kontrollsystem.

Enligt nionde kapitlet i SSMFS 2008:1 ska den preliminära avvecklingsplanen kompletteras och hållas aktuell så länge anläggningen är i drift och den ska redovisas för SSM vart tionde år. Innan rivningsdriften får påbörjas ska avvecklingsplanen vara inarbetad i säkerhetsredovisningen för anläggningen. Säkerhetsredovisningen ska säkerhetsgranskas samt prövas och godkännas av SSM. Till detta fogas den miljökonsekvensbeskrivning som ges in till miljödomstolen enligt förordningen om miljökonsekvensbeskrivningar.

Tillståndshavare ansvarar för att myndighetskraven enligt figur 7-1 uppfylls.



Figur 7-1. Översikt av myndighetskrav på avvecklingsplanering under ett kärnkraftverks livslängd.

7.1.1 Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare till svenska kärnkraftsreaktorer

Ansvar för en kärnteknisk anläggning ligger på tillståndshavaren som ansvarar för planering, tillståndsfrågor och genomförande av den fysiska rivningen, samt för att avfallet tas om hand. I detta ingår att fastställa vilken strategi och tidsplan som ska tillämpas vid avveckling och rivning av den enskilda anläggningen.

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avveckling och rivning mellan de kärntekniska anläggningarna. För att kunna säkerställa att hela kedjan från rivning till slutförvaring av avfallet optimeras behövs också samordning. En rivningsgrupp med representanter från kärnkraftsföretagen, Studsvik, SVAFO och SKB bildades i början av 2000-talet då behovet av att hantera avvecklings- och rivningsfrågor i ett forum växte fram. Syftet med gruppen är att den ska fokusera på teknik och logistikfrågor i samband med avveckling av kärntekniska anläggningar, till exempel val av olika tekniska lösningar samt behandling och hantering av avfallet. I detta arbete har kärnkraftsföretagen uppdragit åt SKB att delta i planering och genomförande av kommande rivningar av deras kärnkraftverk och att driva slutförvar för rivningsavfall. SKB:s medverkan avses i huvudsak gälla utveckling av generella metoder och rutiner för rivningsarbetet, aktivitets- och volymuppskattningar, samt klassificering av avfall. SKB ansvarar också för att ta fram uppskattningar av kostnaderna för avveckling och rivning av de svenska kärnkraftverken i Barsebäck, Oskarshamn, Forsmark och Ringhals.

SKB har till uppgift att omhänderta det konditionerade radioaktiva avfallet från rivning. Figur 7-2 åskådliggör ansvarsfördelningen för hanteringen av rivningsavfallet från rivning till slutförvaring via eventuell mellanlagring. SKB ansvarar för hantering av avfallet i sina anläggningar och på fartyget m/s Sigyn.

För att ta hand om det kortlivade rivningsavfallet planerar SKB en utbyggnad av SFR, se avsnitt 5.3. Långlivat avfall som uppstår vid avveckling av kärntekniska anläggningar kommer att mellanlagras till dess att SFL tagits i drift, se kapitel 6. SKB ska i samråd med kärnkraftsföretagen förvissa sig om att avfallet behandlas och förpackas på ett sådant sätt att det lämpar sig för mellanlagring och slutförvaring.

SKB ska även fortsättningsvis, som en del i framtagningen av underlag för dimensionering av transport- och slutförvarssystem samt för avgiftsberäkningar, genomföra rivningsstudier och generella kostnadsberäkningar för avveckling av de svenska kärnkraftverken. SKB ska dessutom bevaka den internationella utvecklingen inom avvecklingsområdet samt följa den teknikutveckling som sker, till exempel genom deltagande i OECD/NEA:s samarbetsprogram och IAEA:s program.

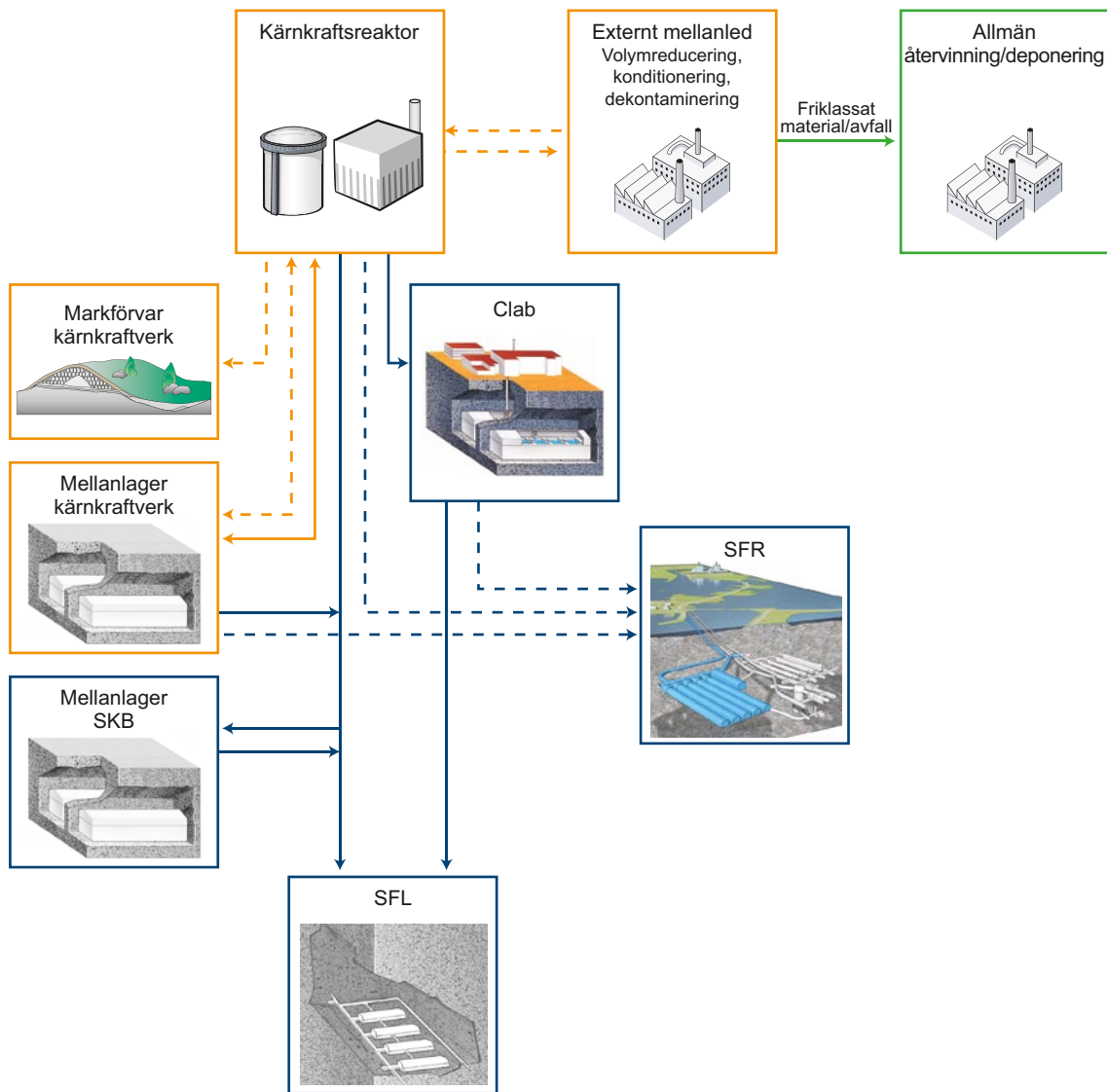
7.1.2 Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare/ägare till Ågesta kraftvärmereaktor

Avvecklingen av Ågestareaktorn och hanteringen av avfall från rivningen finansieras via avgifts- inbetalningar som regleras i Studsvikslagen (1988:1597) och löpande av Vattenfall AB.

Vattenfall innehar det kärntekniska tillståndet för Ågesta men Vattenfall och SVAFO ansökte vintern 2009/2010 om att SVAFO ska få överta det kärntekniska tillståndet från Vattenfall. Ärendet är inte färdigbehandlat. En förutsättning för att SVAFO ska beviljas tillståndet är att företaget organisatoriskt och verksamhetsmässigt bemannas för detta uppdrag.

Service och underhåll av anläggningen sköts sedan många år av Studsvik Nuclear AB på uppdrag av Vattenfall. Detta har godkänts av SSM. När SVAFO övertar det kärntekniska tillståndet kommer SVAFO även att överta service och underhåll.

Ågestas avvecklingsarbete samordnas med avvecklingsarbetet på övriga kärnkraftverk genom Rivningsgruppen. Dessutom står SKB till förfogande vid behov av eventuella forskningsinsatser.



Ansvar transporter och hantering

- - - Kortlivat avfall, tillståndshavare som innehar eller driver en kärnkraftsreaktor
- Långlivat avfall, tillståndshavare som innehar eller driver en kärnkraftsreaktor
- - - Kortlivat avfall, SKB
- Långlivat avfall, SKB

Ansvarsgräns anläggningar

- Tillståndshavare som innehar eller driver en kärnkraftsreaktor
- SKB
- Innehavare av allmänt återvunnet material

Figur 7-2. Illustration av ansvarsfördelning för hanteringen av rivningsavfall samt dess flöde. Notera att figuren beskriver ansvar för transport samt anläggning. Ansvaret för själva avfallet ligger alltid hos kärnkraftsföretagen.

7.2 Planering inför avveckling och rivning

Eftersom avvecklingen i många fall ligger långt fram i tiden har de detaljerade planerna för avvecklingen av kärnkraftverken ännu inte utarbetats av kärnkraftsföretagen. Ett undantag är planerna för Barsebäcksverket där arbete pågår med att ta fram fördjupade studier inför rivningen.

Samtliga tillståndshavare för kärnkraftverken, förutom för Barsebäck, planerar att uppdatera sina preliminära avvecklingsplaner inom det kommande året. Dessa uppdateringar kommer att samordnas med övriga tillståndshavare inom Rivningsgruppen som blir det sammanhållande forumet för arbetet. SKB avser att genom Rivningsgruppen uppdatera de branschgemensamma dokumenten ”Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk” /7-1/ och ”Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar, guideline” /7-2/.

I och med att Barsebäcks planeringsarbete intensifieras kommer fler detaljfrågor och utredningar att diskuteras och samordnas genom Rivningsgruppen. Även rivningsfrågorna för Studsviksreaktorerna, Ågesta och Ranstad kommer att utgöra en bas för kunskapsutbyte. Dessa anläggningar är de första som planeras att rivas och kompetens- och erfarenhetsutbytet blir viktigt för alla medlemmar i Rivningsgruppen samt för de enskilda rivningsprojekten.

Rivningen av SKB:s egna anläggningar ligger långt fram i tiden men avvecklingsplaneringen behövs som underlag till SKB:s program och för att uppfylla gällande lagkrav. I avsnitt 7.2.2 sammanfattas planerna för dessa anläggningar.

7.2.1 Avvecklingsstrategier

Internationellt nämns ofta tre olika strategier för avveckling. De svenska kärnkraftsföretagen planerar i huvudsak att genomföra avveckling i enlighet med den strategi som benämns ”Direct dismantling”. För Barsebäck och Ågesta, som redan är avställda, tillämpas en variant av ”Safestore”.

Direct dismantling eller Early Site Release

Direct dismantling eller Early Site Release innebär att alla komponenter och byggnader som är radioaktiva, dekontamineras och/eller rivs kort tid efter avställning och att avfallet förvaras på platsen i avvaktan på överföring till ett slutförvar alternativt paketeras och transporteras det till ett redan etablerat mellanlager eller slutförvar. Därefter sker friklassning av anläggningen.

Safestore

Avveckling enligt Safestore innebär att anläggningen i stort sett hålls intakt och skyddad under ett antal år (20–150). Under denna tidsperiod övervakas anläggningen och ”dekontamineringen” sker genom avklingning. När aktivitetsnivåerna har minskat påbörjas den egentliga rivningen. I flera fall har rivning kunnat genomföras av de delar av anläggningen som genererar typer av avfall som det finns etablerad hantering och slutförvar för, medan övriga delar (främst reaktor och i förekommande fall grafit) ställs i Safestore i avvaktan på att slutförvar för dessa avfallstyper (långlivat) etablerats.

Entomb

Strategin Entomb för avveckling innebär, att radioaktiva komponenter, system och byggnadsdelar innesluts på plats i till exempel betong. Övervakning sker till dess radioaktiviteten har nått en sådan nivå att tillståndshavarens ansvar och skyldigheter för anläggningen kan upphöra. Denna strategi tillämpas i praktiken inte.

7.2.2 Tillståndshavarnas planering för avveckling och rivning

I detta avsnitt finns en sammanställning av kärnkraftsföretagens avvecklingsplaner för Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals samt Vattenfalls plan för avvecklingen av Ågesta. Här beskrivs innehållet i de preliminära avvecklingsplaner som varje tillståndshavare har sänt in till SSM /7-3, 7-4, 7-5, 7-6, 7-7/ och det fortsatta arbetet med planerna. Avsnittet beskriver också planeringen för avveckling av SKB:s kärntekniska anläggningar.

Eftersom avvecklingen och rivningen ligger olika långt fram i tiden för tillståndshavarna så skiljer detaljeringsgraden i deras respektive planering, vilket återspeglas i texten nedan.

Barsebäck

Barsebäcks båda reaktorer är i servicedrift, det vill säga slutligt avställda och det använda kärnbränslet är bortforslat och Barsebäck Kraft AB (BKAB) har därför enligt gällande föreskrifter presenterat en översiktlig avvecklingsplan /7-3/ där hänsyn tagits till att reaktorerna är i servicedrift. Slutmålet med avvecklingen av Barsebäckverket är att marken och eventuella kvarlämnade byggnader inklusive utrustning ska kunna förklaras radiologiskt friklassade.

Anläggningen har anpassats till servicedriften och en ny säkerhetsredovisning (SAR) och säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) har implementerats. Under servicedriften har BKAB genomfört systemdekontaminering på båda reaktorerna. BKAB:s strategi innebär att rivningen av Barsebäck 1 och 2 samt de gemensamma anläggningsdelarna på platsen, genomförs som ett gemensamt projekt. Rivningsförberedelser planeras kunna starta år 2018 och själva rivningen år 2020, när SFR planeras kunna ta emot det kortlivade rivningsavfallet. Rivning, avfallshantering och transport ska genomföras som industriella processer där låga stråldoser prioriteras. Detta medför att det radioaktiva avfallet hanteras och transporteras som stora enheter och friklassningsåtgärder som dekontaminering utförs enbart när ett större värde kan identifieras ur ett ALARA-perspektiv. Volymen radioaktivt avfall blir därför något större, men detta uppvägs av låga stråldoser till personal, kortare tidsplan och ett mindre behov av resurser. Något markförvar för mycket lågaktivt avfall kommer inte att etableras i Barsebäck.

Det radioaktiva avfall som ska omhändertas av SKB och deponeras i SFR, uppskattas till cirka 18 000 ton vilket motsvarar en förvarsvolym på cirka 16 000 m³. Merparten av avfallet produceras mellan åren 2020 till 2023. Det totala antalet avfallskollin som ska transporteras till SFR bedöms vara ungefär 800 stycken ISO-containrar, 62 stycken betongkokiller, 283 stycken stålkokiller och 22 stycken BFA-tankar. Denna bedömning utgår från att reaktortankarna segmenteras. Förberedelser pågår för att kunna montera ner och transportera hela reaktortankar, vilket kommer att leda till förändringar i antal kollin. Transporterna till SFR bedöms fördela sig jämnt över åren 2020 till 2023. Mängden radioaktivt material som kan friklassas uppskattas till cirka 2 500 ton och består i huvudsak av delar från turbinanläggningen som kan skickas för smältning. Inaktiv betong från olika byggnader uppskattas till cirka 400 000 ton varav huvuddelen kommer att kunna användas som återfyllning på plats.

Forsmark

Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA) har sänt en preliminär avvecklingsplan till SSM /7-4/ vilken avser samtliga tre reaktorer i Forsmark. Planen utgår ifrån att reaktorerna drivs i 40 år. Målet för avvecklingen är att avlägsna det radioaktiva materialet och återställa anläggningen till en friklassad anläggning.

FKA:s strategiska inriktning, enligt den preliminära avvecklingsplanen, är att efter slutlig avställning hålla anläggningarna i servicedrift ett tiotal år innan rivningen påbörjas. Rivningen påbörjas tidigast efter att samtliga reaktorer slutligt har ställts av och systemdekontaminering har utförts. Rivningen av reaktorerna genomförs sammanhängande i tiden. FKA utesluter inte att markförvaring av mycket lågaktivt avfall kan bli aktuellt.

FKA uppdaterar sin avvecklingsplan under år 2010/2011. Behovet av en uppdatering beror i huvudsak på slutsatserna i de pågående blockspecifika rivningsstudierna om planering och strategier, se avsnitt 7.2.3. Rivningsstudierna bygger på FKA:s nu aktuella planering att driva sina reaktorer i minst 50 år och att servicedrifttiden blir så kort som möjligt och inte pågår längre än fem år.

Oskarshamn

OKG AB utgår i sin preliminära avvecklingsplan /7-5/ från en drifttid på 60 år för sina tre reaktorer, vilket överensstämmer med den i dag aktuella planen. Målet för avvecklingen är att uppnå en friklassad anläggning utan restriktioner för användningen av byggnader och mark.

Olika avvecklingsalternativ har studerats, men valet av strategi kommer inte att göras förrän närmare den slutliga avställningen av anläggningarna. Den gemensamma avfallsanläggningen som ligger vid O1/O2 måste vara i drift några år efter stängningen av den sista reaktorn. OKG avser att genomföra kartläggningar av aktiviteten i anläggningarna och göra nya uppskattningar av avfallsvolymen inför den slutliga avställningen av reaktorerna. Då fattas även beslut om systemdekontaminering ska genomföras och om markförvar kan utnyttjas.

När pågående blockspecifika rivningsstudier för Oskarshamnsverken är färdigställda kommer dessa att utgöra en grund för att uppdatera avvecklingsplanen, vilket är planerat under år 2011.

Ringhals

I sin preliminära avvecklingsplan /7-6/ utgår Ringhals AB (RAB) från att drifttiderna är 40 år för reaktorerna R1 och R2 och 50 år för R3 och R4. Målet för avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och återställa anläggningen till en friklassad anläggning.

RAB:s strategi innebär att huvuddelen av rivningen genomförs fem år efter slutlig avställning när systemdekontaminering har utförts. Vidare ska det närliggande blocket vara slutligt avställt innan rivning påbörjas. Enligt planen ska reaktortankarna transporteras och deponeras som stora enheter, utan segmentering. De anläggningar på platsen som avvecklas och rivs sist är avfalls- och serviceanläggningar. Enligt planen ska detta ske åren 2050 till 2053. För mycket lågaktivt avfall utgår RAB i sin planering från att markförvar kan utnyttjas.

RAB:s pågående blockspecifika rivningsstudier kommer att utgöra grunden för en uppdatering under åren 2010–2011 av den preliminära avvecklingsplanen. Studien utgår från att drifttiden för samtliga reaktorer är 50 år. Planen för hur reaktortankarna från PWR ska omhändertas behöver ses över utifrån den kunskap som framkommit i den utredning om hantering av hela reaktortankar från BWR som tagits fram i Projekt SFR-utbyggnad.

Ågesta

Vattenfall har givit SVAFO i uppdrag att avveckla och riva kraftvärmereaktorn i Ågesta. Anläggningen är för närvarande i servicedrift. Allt bränsle och tungt vatten har avlägsnats från anläggningen. I övrigt är det mesta intakt, men två av de fyra huvudvärmeväxlarna (ånggeneratorerna) har tagits ut, dekontaminerats och smälts, varefter göten kunde friklassas. Vidare har dieselgeneratoraggregat och batterier avlägsnats och nu är det endast bergdränagesystemet som är i drift. Uppföljning sker enligt givna strålskyddsvillkor och viss utrustning, som vissa lyftanordningar, underhålls för att underlätta en framtida rivning.

Servicedriften planeras fortsätta fram till dess att rivning startar, tidigast cirka år 2020 då gällande miljötillstånd går ut. En preliminär avvecklingsplan för anläggningen har tagits fram /7-7/ där olika alternativa målsättningar för en avveckling diskuterats. Det alternativet som i dag ter sig realistiskt är en friklassning av markområdet och hela berggrummet. När avvecklingstidpunkten närmar sig kommer ett alternativ att väljas, motiveras och redovisas i detalj.

Det som kvarstår av radioaktiva delar är huvudsakligen reaktortank, två ånggeneratorer samt 30 styrdon med inducerad aktivitet samt primära rörsystem. Huvuddelen av aktiviteten finns i reaktortanken med dess interndelar. Det finns två alternativ utredda för hur dessa kan hanteras, antingen att transportera och deponera tanken hel, eller att segmentera den. Oavsett vilket av de två alternativen som väljs kommer åtgärder att vidtas för att minimera dosen till personalen, bland annat genom fjärrmanövrering. Huvudalternativet för omhändertagande av reaktortanken är tills vidare segmentering men i nuläget kan alternativen inte särskiljas dosmässigt. Inför rivningsarbetet kommer noggrannare utredningar att genomföras.

Att tidigarelägga rivningen skulle innebära att det radioaktiva rivningsavfallet måste transporteras och mellanlagras på annan plats, eftersom SFR inte kommer att vara klart för att ta emot detta avfall förrän cirka år 2020. En tidigareläggning bedöms inte ha några dosmässiga fördelar, snarare innebär det att dosen till personal ökar eftersom effekten av sönderfall minskar.

Åtgärder kommer att vidtas för att undvika stråldoser till omgivningen och minimera dosbidrag till personalen, i enlighet med ALARA-principen. Nya mätningar av radioaktiviteten kommer att genomföras inför rivningen, då detaljeringsgraden av förberedelserna ökar.

Avvecklingsplanen bygger på att all onödig hantering av avfallet kan undvikas. Ågestaanläggningen utgör i nuläget ett mellanlager för radioaktivt material. Eftersom anläggningen drivs med minimal påverkan på personal och omgivning kommer inte rivningen att påbörjas innan slutförvar eller mellanlager för avfallet finns tillgängliga.

Ågesta ligger, till skillnad från övriga reaktorer, långt från någon hamn. Detta innebär att avfallet från rivningen kommer att behöva transporteras med lastbil på allmän väg. Avfallet kommer att transporteras till en anläggning där det behandlas (volymreducering, konditionering, dekontaminering) och radioaktiviteten mäts innan det transporteras till ett slutförvar. För att kunna transportera rivningsavfallet från Ågesta kommer det, enligt dagens gällande lagar och krav, att behövas ett särskilt tillstånd om transport av farligt gods på väg. Tidigare erfarenheter att utföra denna typ av transporter finns redan inom branschen, till exempel ånggeneratorerna från Ringhals samt dagens transporter av lågaktivt avfall för behandling i Studsvik.

Miljörapporter ges ut årligen och detta kommer att fortgå under avvecklingen enligt gällande krav. Innan en ansökan om rivning lämnas in kommer förekomsten av miljöfarliga ämnen att kartläggas, och en plan för omhändertagandet av dessa att presenteras. Vissa kartläggningar utförs redan nu av det radioaktiva och miljöfarliga avfallet, vilket enligt planerna ska deponeras i SFR, som underlag till tillståndsansökan för utbyggnad av SFR.

Under år 2010-2011 kommer Ågestas rivningsstudie att uppdateras i enlighet med pågående blockspecifika rivningsstudier för kärnkraftverken, se avsnitt 7.2.3.

En friklassningsutredning för områdena utanför inneslutningen i Ågesta har tagits fram och en ansökan om friklassning av dessa områden har lämnats in till SSM under år 2010.

SKB:s kärntekniska anläggningar

Clink

SKB är tillståndshavare för Clab och kommer att vara det också för den integrerade anläggningen som benämns Clink när utbyggnaden av den planerade inkapslingsanläggningen är klar. Avvecklingsplanen för Clink /7-8/ är preliminär och följer de krav som myndigheter ställer på SKB inför den kommande tillståndsprovningen av tillbyggnaden med inkapslingsanläggningen.

Clink kommer att avvecklas när allt använt kärnbränsle kapslats in och deponerats i Kärnbränsleförvaret. Tidsplanen beror på när den sista kärnkraftsreaktorn tas ur drift. Baserat på nuvarande referensscenariot /7-9/, som bygger på 50 års drift av kärnkraftverken i Forsmark och Ringhals och 60 år för Oskarshamnverket, skulle rivning av Clink kunna inledas omkring år 2070 och vara avslutad efter 5–7 år. Detta innebär att Clink fortfarande drivs när den sista anläggningen i OKG:s ägo har stängts av.

Under arbetet med att ta fram avvecklingsplanen för Clink har det inte framkommit något skäl till att avvecklingen skulle bli mer komplicerad än för de övriga kärntekniska anläggningar vars avveckling ligger närmare i tiden. Rivningen bör kunna genomföras med låg dos till personal och mängden kort- och långlivat radioaktivt avfall beräknas bli begränsad. Det radioaktiva rivningsavfallet ska enligt gällande version av avvecklingsplanen skickas till SFL, men har i senare versioner av SKB:s planer styrts om till SFR.

Målet med avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och återställa Clink till en friklassad anläggning, enligt strålskyddslagens definition. Det innebär att byggnader inklusive all utrustning och mark ska förklaras friklassad.

SKB planerar att ta fram en rivningsstudie för Clink under 2011 som underlag till utbyggnaden av SFR. Denna studie kan visa på behov av att uppdatera avvecklingsplanen.

SFR

SFR:s ovanmarksdelar är trots avsaknad av radioaktivt material att betrakta som en kärnteknisk anläggning och omfattas av kravet på en preliminär avvecklingsplan. Med hänsyn till att anläggningens ovanmarksdelar kan betraktas som konventionella byggnader är det inte relevant med en så omfattande redovisning som föreslås i de framtagna riktlinjerna /7-2/. Därför har SKB skickat en förenklad redovisning av hur avvecklingen av SFR planeras att genomföras /SKBdoc 1049861/ till SSM. Till ansökan för att bygga ut SFR kommer avvecklingsplanen för SFR att ses över.

Det slutliga målet för avvecklingen är att antingen riva byggnader ovan mark eller att bibehålla dessa för annan verksamhet. Beslut om vilket alternativ som ska genomföras tas av SKB inför avvecklingen. Förslutning av tunnarna redovisas i anläggningens säkerhetsredovisning.

Något särskilt system för slutförvaring av kärnavfall från avvecklingen är inte relevant. De systemdelar som kan vara lätt kontaminerade (till exempel delar av ventilationssystemet) nedmonteras och förs ner i anläggningens förvaringsdelar innan tillfartstunnarna försluts. Någon borttransport av rivningsmaterial från anläggningen torde inte vara nödvändig, eftersom rivningsmaterial kommer att kunna användas som återfyllnad av transporttunnarna, givet att miljötillstånd för en sådan hantering ges.

SFR kommer liksom SKB:s övriga anläggningar för avfallshantering, att vara bland de sista kärntekniska anläggningar som avvecklas i Sverige. Det kommer därför att finnas erforderlig kunskap och erfarenhet från avveckling och rivning av andra kärntekniska anläggningar. Krav på sådan erfarenhet är dock mycket begränsad eftersom anläggningen är en konventionell industrianläggning när avvecklingen sker.

Eftersom ingen radioaktivitet finns kvar i anläggningen, när de eventuellt kontaminerade delarna av ventilationssystemen tagits bort, föreligger ingen risk för radiologiska olyckor i samband med avvecklingen. Organisationen vid anläggningen kommer att anpassas till vald strategi för avveckling och eventuell rivning med beaktande av de regler och föreskrifter som gäller vid tiden för avvecklingen.

SFL

Ingen avvecklingsplan finns ännu framtagen för SFL eftersom anläggningen ännu bara är på konceptstadiet. För SFL:s avveckling hänvisas till avsnitt 4.2.2.

Kärnbränsleförvaret

En preliminär avvecklingsplan för Kärnbränsleförvaret finns framtagen och kommer att ingå i ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet.

Slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle består av en ovanmarksdel och en undermarksdel. Delarna ovan och under mark är förbundna med en ramp och flera schakt, bland annat för ventilation. Undermarksdelen består av ett centralområde, och ett flertal deponeringsområden. De sistnämnda bildar förvarsområdet. Den förslutna undermarksdelen utgör själva slutförvaret.

Avvecklingen vidtar efter det att den huvudsakliga driften avslutats, det vill säga när allt använt kärnbränsle deponerats och deponeringstunnarna, återfyllts och pluggats. Avvecklingen innebär förslutning av återstående delar av undermarksdelen och rivning av ovanmarksdelen.

När avvecklingen startar kommer det inte att finnas någon kontamination i anläggningen. Rivningen utförs därför som för en konventionell anläggning. Rivningsavfall sorteras och återvinns i möjligaste mån, eller läggs på deponi. Farligt avfall hanteras i enlighet med gällande bestämmelser. En markundersökning genomförs, och ligger till grund för efterbehandling av området.

Arbetet med avvecklingsplanen för Kärnbränsleförvaret hanteras inom Kärnbränsleprogrammet.

7.2.3 SKB:s planering för avveckling och rivning

Genom egna studier och genom att aktivt följa vad som sker internationellt, bygger SKB tillsammans med kärnkraftsföretagen upp kompetens för att kunna planera och genomföra kommande avvecklingsprojekt. SKB:s målsättning är att kunna ta omhand det radioaktiva avfallet från rivning i överensstämmelse med de avvecklingsplaner som tas fram för respektive anläggning. Planerna för kärnkraftverken och för SKB:s anläggningar uppdateras successivt i dialog mellan berörda parter. Arbetet med planerna är en iterativ process där kompetensen och förståelsen ökar och rivningsstudierna uppdateras och förfinas. Det formella forumet för detta arbete är Rivningsgruppen.

Studier av avveckling och rivning av kärnkraftverk har genomförts i SKB:s regi i samarbete med kärnkraftsföretagen under mer än 20 år. Studierna har baserats på att en referensanläggning har utsetts för BWR- respektive PWR-anläggningarna. För referensanläggningarna har detaljerade rivningsstudier genomförts och resultaten har sedan överförts till övriga anläggningar. Strategier och teknik har sammanställts /7-1/ och de antas vara desamma för alla kärnkraftsblocken. I kärnkraftsföretagens preliminära avvecklingsplanering har sammanställningen använts som riktlinje.

För att få ett bra underlag för transport, mellanlagring och slutförvaring av rivningsavfall, pågår nu blockspecifika rivningsstudier i samarbete mellan SKB och kärnkraftsföretagen. I dessa studier inkluderas eventuella lokala avvikelser från referensanläggningarna. Uppskattningar av avfallsvolymer samt uppskattningar av det nuklidspecifika aktivitetsinnehållet i avfallet kommer att användas som underlag för planering av utbyggnaden av SFR samt för analys av förvarets långsiktiga säkerhet. Studierna omfattar kartläggning av både kontrollerat och icke kontrollerat område på kärnkraftverken. Samordningsvinster uppnås då hela anläggningen går igenom vid ett tillfälle och tillståndshavaren får grundliga data för såväl kärnavfall som konventionellt avfall.

Förutom uppskattningar av volymer och kostnader görs en genomgång av teknik och logistik för rivningen. Typen av rivningsarbeten i en anläggning varierar och därför redovisas flera olika rivningstekniker och rekommendation för val av optimal teknik föreslås för varje typ av arbete. Endast beprövade, nu existerande tekniker väljs för att minimera risker och kostnader. I vissa fall kommer den rekommenderade tekniken för rivning att vara densamma som används vid underhållsarbete under driften av kärnkraftverket. Redovisningen av logistiken omfattar planen för i vilken ordning allt ska rivas för att uppnå optimala avfallsströmmar på kärnkraftverket och minimera stråldoserna. Stor betydelse för tidsplanen har rivningen och hanteringen av reaktortanken och dess interndelar, eftersom det är ett av de stora rivningsarbeten som påbörjas först.

Logistik för omhändertagande av rivningsavfallet från samtliga kärnkraftverk har studerats i underlag till sammanställningen av strategier och teknik /7-1/. En slutsats är att transport och deponering av rivningsavfall inte kommer att vara begränsande faktorer för planeringen av när de olika kärnkraftverken kan rivas.

I gemensamma utredningar studeras även ny teknik som till exempel hantering av stora komponenter utan sönderdelning.

Pågående föreskriftsarbete vid SSM, avseende regler för friklassning av material, lokaler och byggnader samt regler för markdeponering av mycket lågaktivt avfall, kan komma att påverka mängden avfall till SKB:s anläggningar. Tills vidare antar SKB att allt material som inte friklassas kommer att slutförvaras som radioaktivt avfall i SFR eller SFL.

Kärnkraftsföretagen redovisar i sina avvecklingsplaner olika strategier för hanteringen av det mycket lågaktiva rivningsavfallet. För att nå en samsyn och som underlag till utbyggnaden av SFR har en förstudie tagits fram under 2010 som redovisar olika alternativ för hur det mycket lågaktiva avfallet kan slutförvaras. De alternativ som belyses är markförvar på respektive kärnkraftverk, ett gemensamt markförvar eller SFR. En vidareutveckling av studien planeras under 2011 varefter beslut om inriktning förväntas kunna fattas, se avsnitt 5.5.

7.3 Utveckling av metoder och teknik för avveckling

7.3.1 Internationellt arbete och samarbete

SKB bevakar och deltar i det internationella utvecklingsarbete som pågår inom avveckling och teknik för rivning bland annat genom att SKB har ordförandeskapet i NEA:s undergrupper CPD/TAG (The International Co-operative Programme on Decommissioning/Technical Advisory Group) och DCEG (Decommissioning Cost Estimating Group). CPD/TAG behandlar ett 40-tal pågående internationella avvecklingsprojekt och DCEG har fokus på kostnader inom avveckling och rivning.

Pågående arbete inom DCEG behandlar jämförelser och utvärderingar av kostnader för avveckling av anläggningar i olika länder. Ett viktigt verktyg för detta arbete är den gemensamma struktur ”A Proposed standardised list of items for costing purposes, Interim Technical Document (Yellow Book)” /7-10/ som används för att redovisa kostnaderna. Inom DCEG pågår också, med aktiv medverkan från såväl NEA som EC och IAEA, en uppdatering av verktyget (Yellow Book).

Studsvik och BKAB deltar i TAG med R2-reaktorn respektive Barsebäck 1 och 2 som rivningsprojekt. BKAB deltar i WPDD:s (Working Party on Decommissioning and Dismantling) utredning kring hantering av stora komponenter samt i EPRI Decommissioning Technical Program. BKAB deltar även i IAEA:s IDN (International Decommissioning Network).

7.3.2 Kärnkraftsföretagens utvecklingsarbete

För Barsebäck har större studier genomförts både för rivning och demontering av en hel reaktortank och för segmentering av reaktortank och interndelar. Dessutom har aktivitetsinventarium för avfallet som uppstår vid rivningen av blocken uppskattats.

Pågående och planerade studier för Barsebäck är:

- Kartläggning och kategorisering av anläggning och omgivning avseende kontamination samt miljöfarligt avfall.
- Fastställande av radiologiska kriterier för rivning.
- Friklassningsrutiner för mark och byggnader.
- Fastställande av kravbilderna för rivningsdrift.
- Rivningsstudier som behandlar teknik, logistik och kostnader.
- Organisation för rivningsdrift.

Barsebäck är det kärnkraftverk som kommer att rivs först och eftersom detaljnivån i underlagen, enligt verkens preliminära avvecklingsplaner ökar när tidpunkten för rivning närmar sig, sker det mesta av utvecklingsarbetet för Barsebäck. Detta arbete redovisas i Rivningsgruppen och är representerat i TAG för att utbyta erfarenheter och höja kompetensen i branschen.

För de övriga kärnkraftverken sker utvecklingsarbetet mestadels genom de frågor och aktiviteter som drivs och redovisas via Rivningsgruppen.

Viktig erfarenhet erhålls när verken genomför revisioner och byter ut komponenter. Detta ger bra kunskap inför rivning både avseende teknik och underlag för att uppskatta kostnader för arbetet och hanteringen, transporten och slutförvaring av komponenterna.

7.3.3 Friklassning

En viktig parameter för teknik- och strategival i avvecklingsarbetet är de gällande friklassningskraven. SSM avser att följa EU:s rekommendationer på området, vilka kommer att ligga till grund för kommande föreskrifter för friklassning.

SSM anger att man i dagsläget inte ämnar ange några generella friklassningsnivåer för mark. I stället vill man fastställa friklassningsnivåer för varje enskilt objekt med utgångspunkt från den aktuella platsens egenskaper och den fortsatta användningen av marken. Remissutgåvan av SSM:s föreskrift hänvisar till de internationella rekommendationerna från ICRP och IAEA som anger ett

dosbegränsningskriterium (dose constraints) på cirka 300 mikrosievert per år för en individ som exponeras för en kvarvarande förorening.

Friklassningsnivåerna för mark har en signifikant betydelse för volymen av det radioaktiva avfall som produceras och är därmed en grundläggande faktor i planeringen inför framtida rivning och återställande av marken. Det bör klarläggas vilka friklassningsnivåer som är tillräckliga, både ur allmänhetens perspektiv och för tänkt framtida användande av marken.

Framtagandet av en handbok har påbörjats av den svenska kärntekniska industrin (inklusive SKB) för att gemensamt skapa en praxis för friklassning och därmed undantag från kärntekniklagen och strålskyddslagen av material, lokaler och byggnader samt mark. Handboken kommer att färdigställas när SSM:s kommande föreskrift om friklassning givits ut. Arbetsättet, som beskrivs i handboken, baseras främst på myndighetens kommande föreskrift. Handbokens syfte är att vara ett verktyg och vägledning vid framtagandet av företagsspecifika rutiner och instruktioner. Den beskriver de principer, processer och rutiner som bör följas under ett friklassningsförfarande. Intentionen är att gällande föreskrifter uppfylls om rutiner och principer enligt handboken följs. Därmed kommer handboken vara till stor hjälp vid detaljplaneringarna av avvecklingen.

Del III

Kärnbränsleprogrammet

- 8 Nuläge och utgångspunkter
- 9 Översikt – teknikutveckling
- 10 Teknikutveckling bränslehantering
- 11 Teknikutveckling kapsel
- 12 Teknikutveckling buffert
- 13 Teknikutveckling återfyllning
- 14 Teknikutveckling förslutning
- 15 Teknikutveckling berg
- 16 KBS-3H – horisontell deponering

8 Nuläge och utgångspunkter

8.1 Introduktion

I Fud-program 2007 gav SKB en lägesredovisning av planeringsarbetet för uppförande och drift av slutförvaret för använt kärnbränsle (Kärnbränsleförvaret). Ett preliminärt genomförandeprogram presenterades och den arbetsmetodik för projektering, byggande och drift som var under utveckling beskrevs. Lägesredovisningen gjordes av två skäl. Det ena var att planerna för bygge och drift utgör planeringsförutsättningar för pågående och planerad teknikutveckling. De ger således en nödvändig bakgrund för redovisningen av teknikutvecklingen. Det andra skälet var att SKB såg det som värdefullt att via granskningen av Fud-programmet få synpunkter på genomförandeplanen, medan den fortfarande var under utveckling.

De synpunkter på SKB:s övergripande planering av slutförvarsprojektet som SKI framförde i sin granskning av Fud-program 2007 gällde i huvudsak krav på underlag för kommande ansökan. Bland annat efterfrågades information om planerade undersökningar under bygge och drift (detaljundersökningar) samt en större tydlighet beträffande formerna för organisatorisk styrning under bygge och drift. Synpunkter som berörde SKB:s utvecklingsarbete gällde väsentligen enskilda teknikområden. Detta behandlas i kapitlen 10–16.

SKB har fortsatt planeringen för byggande och drift av Kärnbränsleförvaret, med sikte på den redovisning som kommer att lämnas i ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen. Genomförandeplanen för Kärnbränsleförvaret övergår därmed från att ha varit en utvecklingsfråga som i huvudsak hanterats inom Fud-processen, till att bli en fråga som ska hanteras inom tillståndsprocessen. Däremot ska utvecklingen av den teknik som behöver finnas framme i olika skeden av bygge och drift även fortsättningsvis hanteras inom Fud-processen.

Denna förändring av vad som redovisas inom tillstånds- respektive Fud-processen får – tillsammans med det faktum att Fud-programmet redovisas kort innan SKB avser att lämna in ansökningarna – konsekvenser för vad som presenteras i föreliggande Fud-program. Tidpunkterna för SKB:s Fud-redovisningar styrs av kärntekniklagen, och får till följd att Fud-programmet denna gång läggs fram samtidigt som sammanställningen av underlaget för ansökningarna befinner sig i slutskedet. En aktuell redovisning av teknikutvecklingen blir då med nödvändighet beroende av bakgrund och förutsättningar som kommer att redovisas i fullständig form först när ansökningarna lämnas in. Det gäller framför allt etappindelning och metodik för bygge och drift, samt konsekvenser av att Forsmark har valts som plats för Kärnbränsleförvaret.

För att ge en bakgrund till hur planerna för teknikutvecklingen inom olika områden kopplar till genomförandet av slutförvaringen av använt kärnbränsle sammanfattas genomförandeplanerna för inkapslingsanläggningen och slutförvaret i detta kapitel. Sammanfattningen avser perioden fram till driftstart, det vill säga huvudskedena tillståndsprövning, uppförande och driftsättning. Det är under dessa skeden som den teknik som utvecklas för KBS-3-systemets komponenter ska tas i bruk, alternativt färdigställas för att kunna tas i bruk när driften startar. Kapitel 9 ger en översikt över programmet för teknikutveckling och hur denna styrs för att säkerställa att teknik som uppfyller kraven levereras i takt med behoven under kommande skeden. Status och planer för utvecklingsarbetet inom olika teknikområden redovisas sedan i kapitlen 10–16, tillsammans med nödvändig bakgrund om förutsättningar i form av bland annat krav och vald referensutformning.

8.2 Huvudskeden och tidsplan

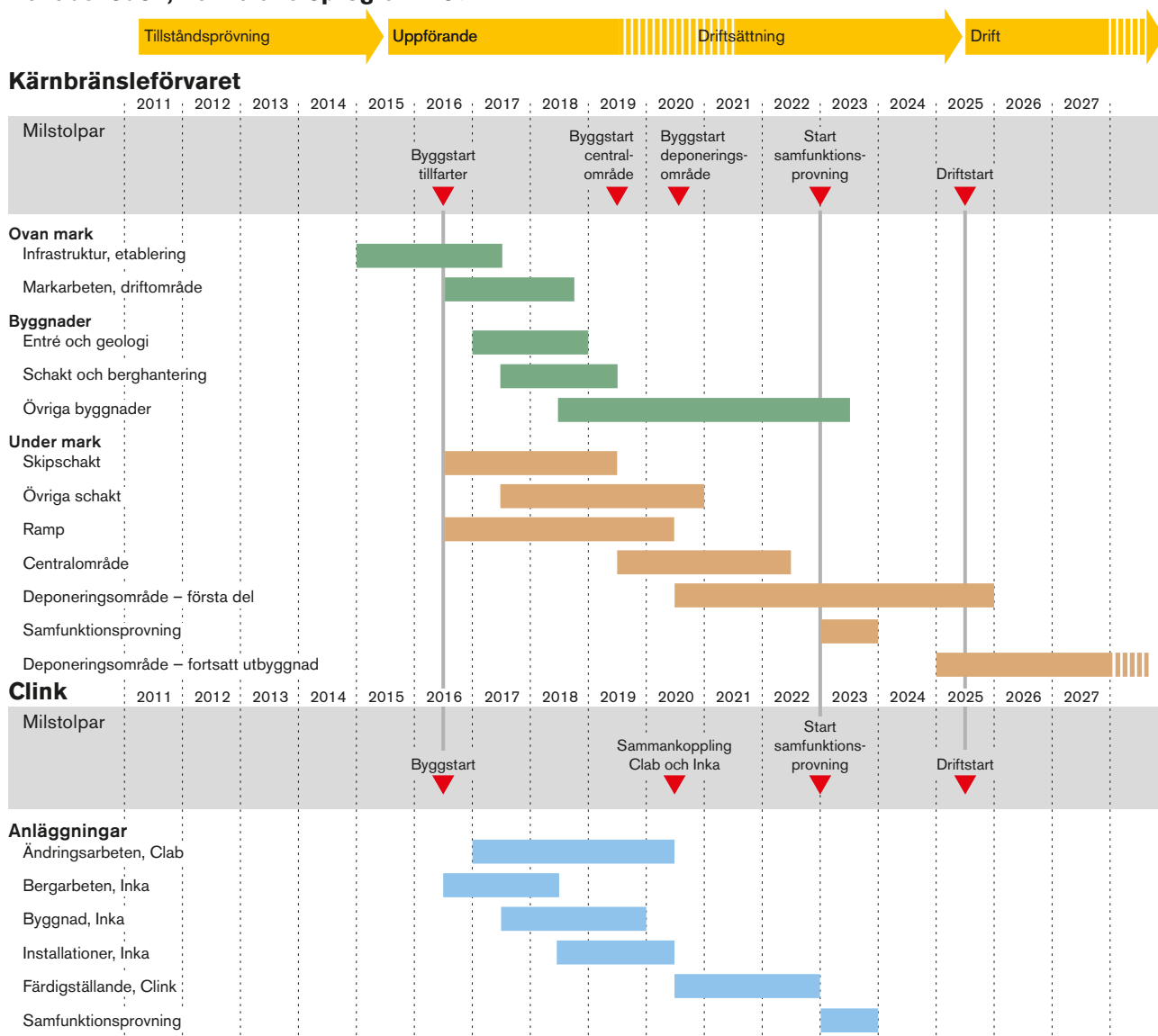
SKB:s planering för den framtida hanteringen av använt kärnbränsle, från mellanlagring i Clab via inkapsling till slutförvaring, sker inom ramen för SKB:s Kärnbränsleprogram. Programmet innefattar tillståndsprövning, projektering, uppförande och driftsättning av inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle. Dessa två anläggningsprojekt är avnämare av den teknikutveckling för KBS-3-systemet som görs med kärnbränsleprogrammet som beställare.

Grundläggande förutsättningar för genomförandeplanen redovisas i handlingsplanen, se avsnitt 2.3. Andra viktiga förutsättningar är:

- Totalt cirka 6 000 kapslar ska hanteras och slutförvaras.
- Vid rutinmässig drift är deponeringstakten 150 kapslar per år. Systemet dimensioneras för en deponeringskapacitet på maximalt 200 kapslar per år.
- Vald referensutförning är KBS-3 med vertikal deponering i ett slutförvar på cirka 500 meters djup. Övergång till horisontell deponering ska vara möjlig.
- Inkapslingsanläggningen uppförs i anslutning till Clab och de båda anläggningarna ska drivas som en integrerad anläggning benämnd Clink.
- Kärnbränsleförvaret förläggs till Forsmark och utformas med anpassning till den berggrund och de förhållanden i övrigt som råder på platsen.
- Driften av systemet ska starta så tidigt som möjligt, dock med realistiska tidsplaner för tillståndsprocess, uppförande och driftsättning.

Figur 8-1 visar SKB:s tidsplan för etablering av Kärnbränsleförvaret och Clink, fram till driftstarten, då provdriften av hela systemet med anläggningar och transporter inleds. Provdriften övergår senare

Huvudskeden, Kärnbränsleprogrammet



Figur 8-1. Tidsplan för etablering av Kärnbränsleförvaret och Clink. Angivna milstolpar avser måltidpunkter för teknikutveckling enligt den plan som redovisas i kapitel 9.

i rutinmässig drift. Genomförandet indelas i fyra huvudskeden: tillståndsprövning, uppförande, driftsättning och drift. Uppförande och driftsättning överlappar tidsmässigt, eftersom anläggningsdelar driftsätts allteftersom de byggs klart och installationer kommer på plats. De verksamheter som planeras under olika skeden sammanfattas för respektive anläggning i avsnitt 8.3 respektive 8.4. De milstolpar som anges i figur 8-1 avser bestämda ”leveranstillfällen” för resultat från teknikutveckling, det vill säga tidpunkter när teknikkomponenter och lösningar ska finnas färdiga att tas i bruk eller ha nått en viss utvecklingsfas, se kapitel 9.

8.3 Inkapsling

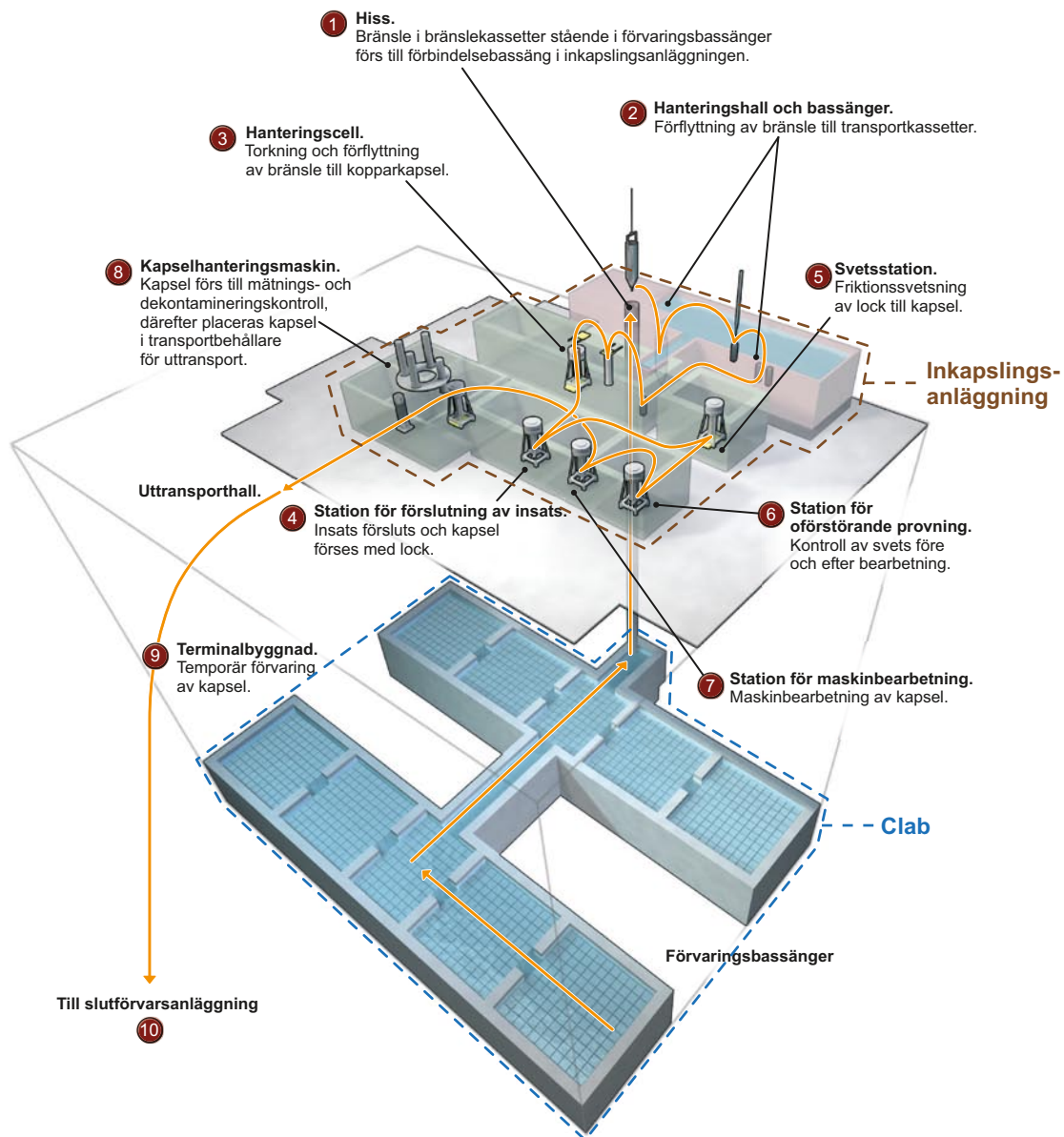
Figur 8-2 visar ett bildmontage av den planerade inkapslingsanläggningen. Byggnaden som inrymmer inkapslingen uppförs i direkt anslutning till Clab. Inför driften sammankopplas anläggningarna till en enhet, benämnd Clink. Driften sker sedan integrerat. Figur 8-3 illustrerar hanteringsgången för bränslet, från förvaringsbassängerna i Clab via inkapslingen till uttransporten av den fyllda och förslutna kapseln.

Ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra inkapslingsanläggningen och att få inneha och driva den som en integrerad anläggning med Clab lämnades in år 2006. Redan i ansökan utlovades kompletteringar och under 2007 erhöll SKB, efter SKI:s och SSI:s inledande granskning, ett antal kompletteringskrav. SKB har beaktat dessa krav, och en komplettering till ansökan lämnades in under 2009.

Den teknikutveckling som pågår och planeras avser främst processerna kring bränslehanteringen, tillverkning av komponenter till kapseln samt förslutningssvetsning och oförstörande provning av komponenter och förslutningssvets. Detta redovisas i kapitel 10 respektive kapitel 11.



Figur 8-2. Bildmontage som visar Clink, den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling. De röda markeringarna anger planerad byggnad för inkapslingen samt en mindre terminalbyggnad.



Figur 8-3. Inkapslingsprocessen för använt kärnbränsle.

8.3.1 Tillståndsprövning

För inkapslingsanläggningen pågår tillståndsprövning enligt kärntekniklagen. Ansökan lämnades in 2006 och kompletterades 2009. När ansökan enligt miljöbalken för hela slutförvarssystemet lämnats in förväntas den fortsatta tillståndsprövningen ske jämsides med prövningen av Kärnbränsleförvaret, och integrerat för hela systemet (se avsnitt 8.4.1). Under prövningsskedet kommer SKB att fortsätta projekteringen av inkapslingsanläggningen och konstruktionen av alla maskiner och installationer. Parallellt fortsätter teknikutvecklingen enligt de planer som redovisas i kapitel 9, 10 och 11. Arbetet under prövningsskedet ska ge underlag för upphandling av anläggning och system och förbereda uppförandet, organisatoriskt och administrativt. När SKB beviljats tillstånd går upphandlingsfasen in i ett slutskede, och uppförandeskedet tar sin början.

8.3.2 Uppförande

Hur verksamheten under uppförande och driftsättning kommer att organiseras, ledas och styras redovisade SKB i en bilaga till ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen /SKBdoc 1056406/.

Driften av Clab kommer att fortgå under hela uppförandet av inkapslingsanläggningen. Detta kommer att kräva en långtgående anpassning av byggarbetena för att inte äventyra säkerheten i Clab och för att minimera störningarna på driften. Utbyggnaden av Clab (Clab-2) gjordes på samma sätt och erfarenheterna därifrån är en viktig tillgång när inkapslingsanläggningen konstrueras och byggs.

Byggområdet för inkapslingsanläggningen kommer att hållas skilt från Clab:s driftområde, fram till dess anläggningarna ska kopplas samman. Uppförandeskedet kommer inledningsvis att domineras av bergarbeten, för att successivt övergå i byggnadsarbeten och slutligen montagearbeten. Under den senare delen av uppförandeskedet börjar också organisatoriska och administrativa förberedelser för sammankopplingen av anläggningarna och driftsättningen av den integrerade anläggningen.

8.3.3 Driftsättning

Den fysiska sammankopplingen av anläggningarna kommer att ske först när inkapslingsanläggningen är färdigbyggd, ändringar i Clab gjorda och delsystemen i respektive anläggning är installerade och provade så långt det är möjligt. Då avlägsnas skiljande väggar, och system och kommunikationsvägar kopplas ihop. Därefter vidtar samfunktionsprovning och intrimning av hela den integrerade anläggningen Clink. Den avslutande samfunktionsprovningen innefattar hela slutförvarssystemet, det vill säga även slutförvarsanläggningen och kapseltransporterna dit.

8.4 Slutförvarsanläggning

Ett mångårigt lokaliseringsarbete har lett fram till att SKB:s styrelse i juni 2009 beslutade välja Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle. Valet stod mellan Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Motiven för att välja Forsmark kommer att redovisas i ansökningarna enligt miljöbalken och kärntekniklagen.

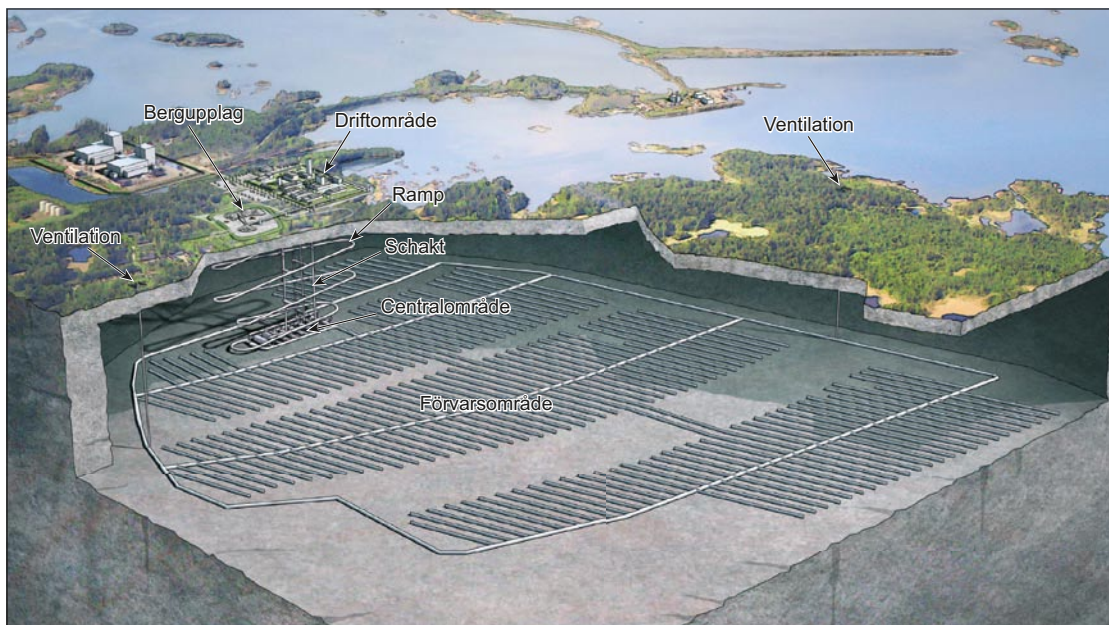
Beslutet att förlägga Kärnbränsleförvaret till Forsmark innebär att planeringen för uppförande och drift av förvaret har gått in i en ny fas. De rent industriella förutsättningarna för projektet är klarlagda. Teknikutvecklingen kan inriktas på att ta fram lösningar som uppfyller krav på säkerhet och funktionalitet för de förhållanden som råder i Forsmark. Betydelsen av denna precisering av förutsättningarna varierar mellan olika teknikområden. För exempelvis anpassning och val av metoder för uttag, tätning och stabilisering av berget har begränsningen till de specifika bergförhållanden som vi vet kännetecknar Forsmark stor betydelse. Motsatsen kan exemplifieras med utvecklingen av maskiner för kapseltransport och deponering, som är nästan helt oberoende av platsspecifika förutsättningar.

Figur 8-4 och 8-5 visar den utformning av Kärnbränsleförvaret i Forsmark som tagits fram under platsundersökningsskedet. Styrande för utformningen har varit att förvaret förläggs inom det område med lämplig berggrund som identifierats, samtidigt som anläggningar och verksamhet ovan mark i huvudsak ska kunna inrymmas inom det befintliga industriområdet. Resultatet är ett förvar på cirka 470 meters djup, som sträcker sig cirka 2,5 kilometer mot sydost från kärnkraftverkets kylvattenkanal. Anläggningarna ovan mark samlas till ett driftområde vid Söderviken, strax sydost om kanalen.

Det förvar som illustreras i figur 8-4 och 8-5 är resultatet av en iterativ process. De resultat som undersökningarna successivt producerat har legat till grund för en serie gradvis mera fullständiga platsbeskrivningar. Dessa har tillsammans med generella krav på förvaret och andra förutsättningar utgjort grunden för att ta fram den platsanpassade förvarslösningen. Parallellt har säkerhetsbedömningar gjorts och miljökonsekvenserna av ett slutförvar på platsen utretts. Slutresultaten av denna process har redovisats i en serie rapporter, som också utgör underlag för de ansökningar som SKB nu utarbetar. Platsbeskrivningen redovisas i /8-1/ och utformningen av anläggningens bergförlagda delar i /8-2/. En preliminär version av miljökonsekvensbeskrivningen för hela slutförvarssystemet, inklusive förvaret i Forsmark, har redovisats inom ramen för MKB-samrådet. Resterande rapporter kommer att redovisas i samband med att ansökan lämnas in.



Figur 8-4. Bildmontage med de markförlagda delarna av den planerade slutförvarsanläggningen i Forsmark. De röda markeringarna visar driftområdet och upplag för bergmassor. Till vänster i bilden syns delar av kärnkraftverket.



Figur 8-5. Slutförvaret för använt kärnbränsle i Forsmark, fullt utbyggt.

8.4.1 Tillståndsprovning

Tillståndsprovningen av Kärnbränsleförvaret börjar när ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken har lämnats in. Hur tillståndsprovningen drivs bestäms framför allt av miljödomstolen, SSM och regeringen. SKB förutser betydande insatser för bland annat redovisningar och eventuella kompletteringar. Under provningsskedet ska också en PSAR (preliminary safety assessment report, preliminär säkerhetsredovisning) utarbetas och lämnas in till SSM.

En huvuduppgift för slutförvarsprojektet under den period när tillståndsprovningen pågår är att, i ett tempo som är anpassat till tillståndsprovningens framdrift, göra alla de förberedelser som krävs för att påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvaret. Uppförandeskedet kommer att ställa andra krav än dagens på SKB:s organisation och verksamhet. Det gäller exempelvis styrning av projektet baserat på informationsflödet mellan byggarbeten och undersökningar, modellering, projektering och säkerhetsanalys. En central uppgift på plats i Forsmark blir att bygga upp en organisation som är anpassad för detta.

Parallellt med tillståndsprovningen kommer SKB att gå vidare med projekteringen av Kärnbränsleförvaret. I ett första steg görs en systemprojektering, som blir den sista samlade projekteringen av hela anläggningen. Nästa steg är detaljprojektering, som ska resultera i bygghandlingar. Detaljprojekteringen görs inte för hela anläggningen samtidigt, utan i den takt underlag behövs för upphandlingar och byggarbeten. Under provningsskedet detaljprojekteras därför anläggningsdelar som ska byggas tidigt. Det är framför allt tillfarterna till förvaret, det vill säga ramp och schakt, och delar av de markförlagda anläggningarna. För delar som ska byggas senare, exempelvis deponeringsområden, görs detaljprojekteringen under byggskedet och delvis som en del av själva byggprocessen.

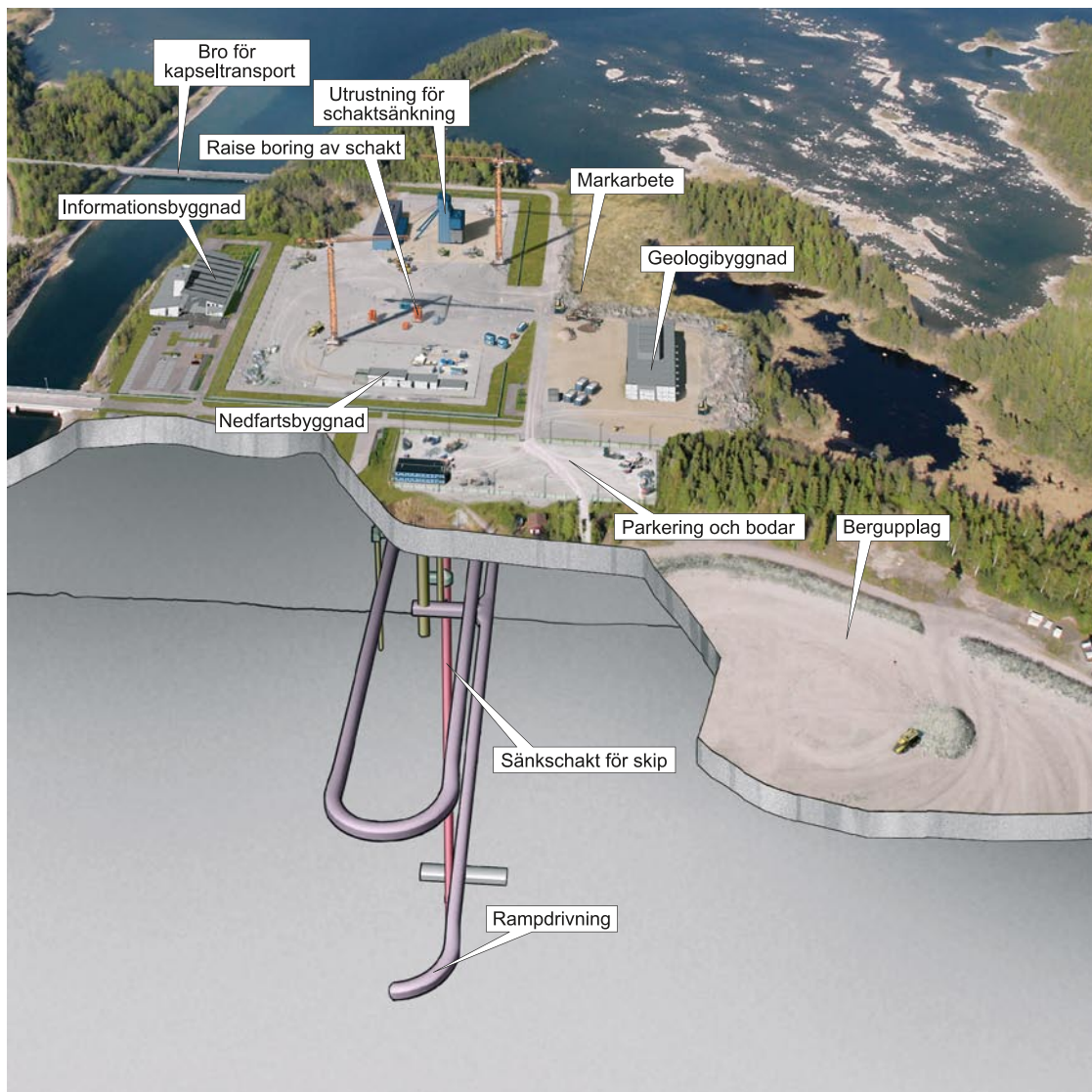
Byggtekniska och ingenjörsgelogiska undersökningar planeras som stöd för projekteringen innan byggstart. Markundersökningar kommer att göras som underlag för placering av byggnader och dimensionering av grundläggning. Även yt nära berg kommer att undersökas, bland annat i planerade lägen för tillfarter. Den lokala infrastrukturen för anläggningarna kommer att förberedas. Det handlar i stor utsträckning om att i samarbete med Forsmarks Kraftgrupp AB anpassa den infrastruktur som redan finns i Forsmark så att även Kärnbränsleförvarets behov kan tillgodoses.

8.4.2 Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av slutförvarsanläggningen. Det innebär bland annat att en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) ska ha lämnats in och godkänts av SSM. Uppförandet blir det mest arbetsintensiva skedet i hela slutförvarsprojektet. Stora krav kommer att ställas på väl fungerande styrning och arbetsflöden. Det arbetssätt som SKB avser att tillämpa sammanfattas i avsnitt 8.4.4.

Uppförandet av undermarksanläggningarna kan indelas i tre överlappande etapper – den första när tillfarter (schakt och ramp) drivs ner till förvarsnivån, den andra när centralområdets bergutrymmen byggs, och den tredje när ett första deponeringsområde etableras. Figur 8-6, 8-7 och 8-8 illustrerar dessa etapper. Bygget av tillfarterna är tidskritiskt för hela projektets framdrift. Rampen och det första schaktet sprängs ut parallellt, från ytan och nedåt. Intill dess att schaktet nått förvarsnivån är bergarbetena begränsade till dessa två fronter. När förvarsnivån nåtts startar utsprängningen av centralområdet med en berglaststation. När berglaststationen och berguppföringen till ytan via berghissen (skipen) kan tas i drift ökar kapaciteten i berghanteringen radikalt och flera drivningsfronter kan successivt etableras. Bergarbetena för tillfarter och centralområde åtföljs av omfattande montagearbeten för den utrustning som behövs för driften av anläggningen.

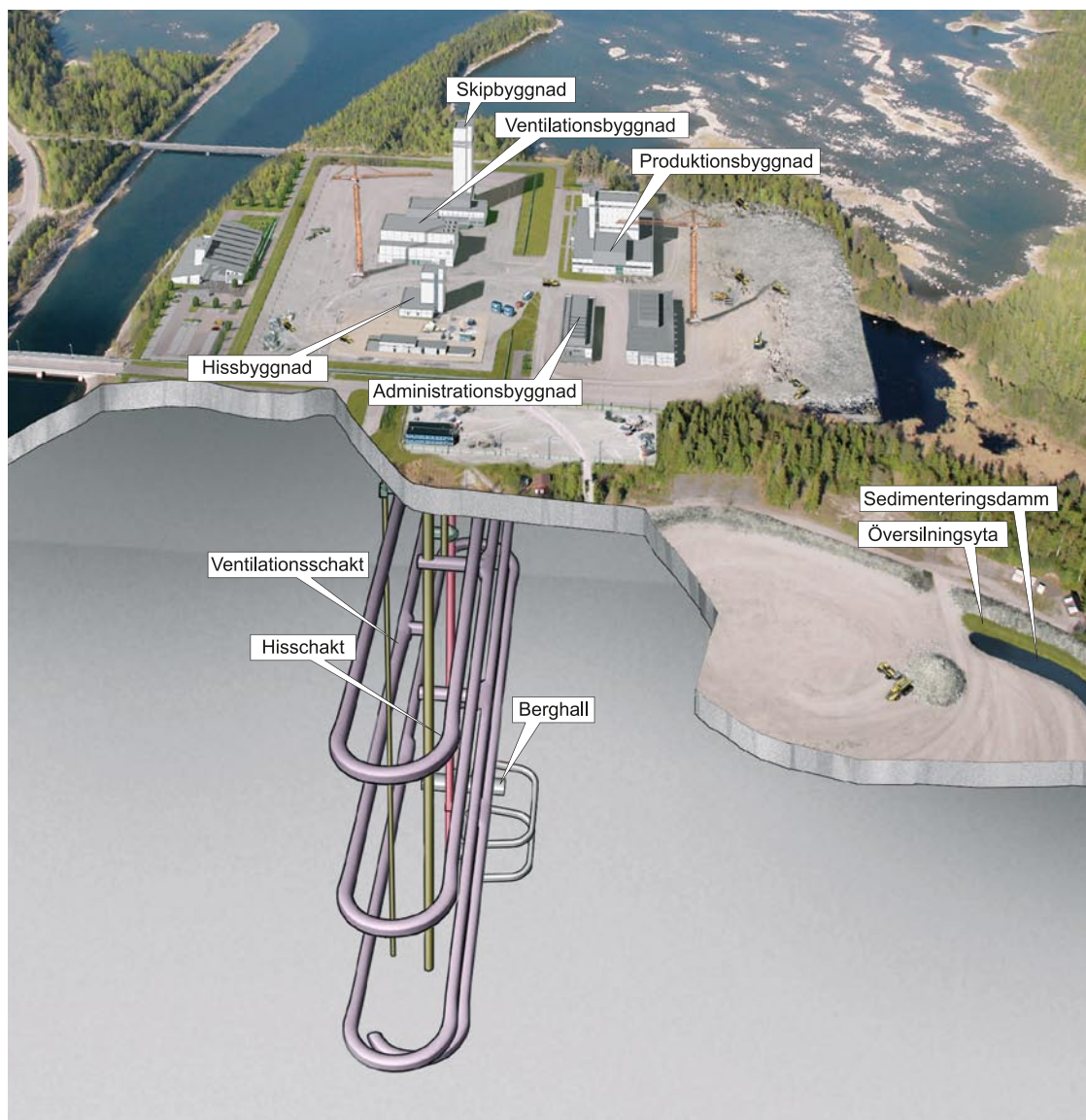
Drivningen av tillfarterna och centralområdet kommer att ge fördjupade kunskaper om bergförhållandena och erfarenheter som måste kunna tas tillvara och omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller förändrad förvarsutformning. En arbetsmetodik som medger effektiv erfarenhetsåterföring är därför nödvändig, se avsnitt 8.4.4.



Figur 8-6. Slutförvarsanläggningen i slutfasen av den första etappen av uppförandeskedet, cirka 2 år efter byggstart. Drivningen av det första schaktet (skipschaktet) har nått ner till den blivande förvarsnivån och rampen närmar sig. Ett fåtal byggnader har uppförts på driftområdet.

Under hela byggprocessen görs omfattande bergundersökningar (detaljundersökningar). I det korta perspektivet ska undersökningarna ge det ingenjörsgelogiska underlag som tillsammans med byggerfarenheterna möjliggör löpande anpassning av bergarbetena till lokala bergförhållanden. På längre sikt ska undersökningarna också ge underlag för de anpassningar av förvarets utformning som kan krävas för att möta konstruktionsförutsättningar med avseende på bland annat långsiktig säkerhet. Vid behov ska platsbeskrivningar och säkerhetsanalyser kunna revideras med ledning av resultaten från undersökningarna.

Parallellt med utbyggnaden av centralområdet görs undersökningar för det första deponeringsområdet och en tunnel drivs som ger tillträde till detta område. Från tunneln drivs ett fåtal deponeringstunnlar där deponeringshål borrar. Syftet med att färdigställa ett deponeringsområde i detta tidiga skede är dels att samla de geovetenskapliga data som behövs för att underbygga en förnyad säkerhetsredovisning inför provdrift, dels att skapa utrymme för implementering av hanteringsteknik för deponering och samfunktionsprovning av hela processen under driftsättningsskedet. När driften sedan inleds ska området användas för deponering av de första kapslarna med använt kärnbränsle. Utbyggnaden omfattas därför av alla tekniska och administrativa krav och kontroller som kommer att gälla för driften.

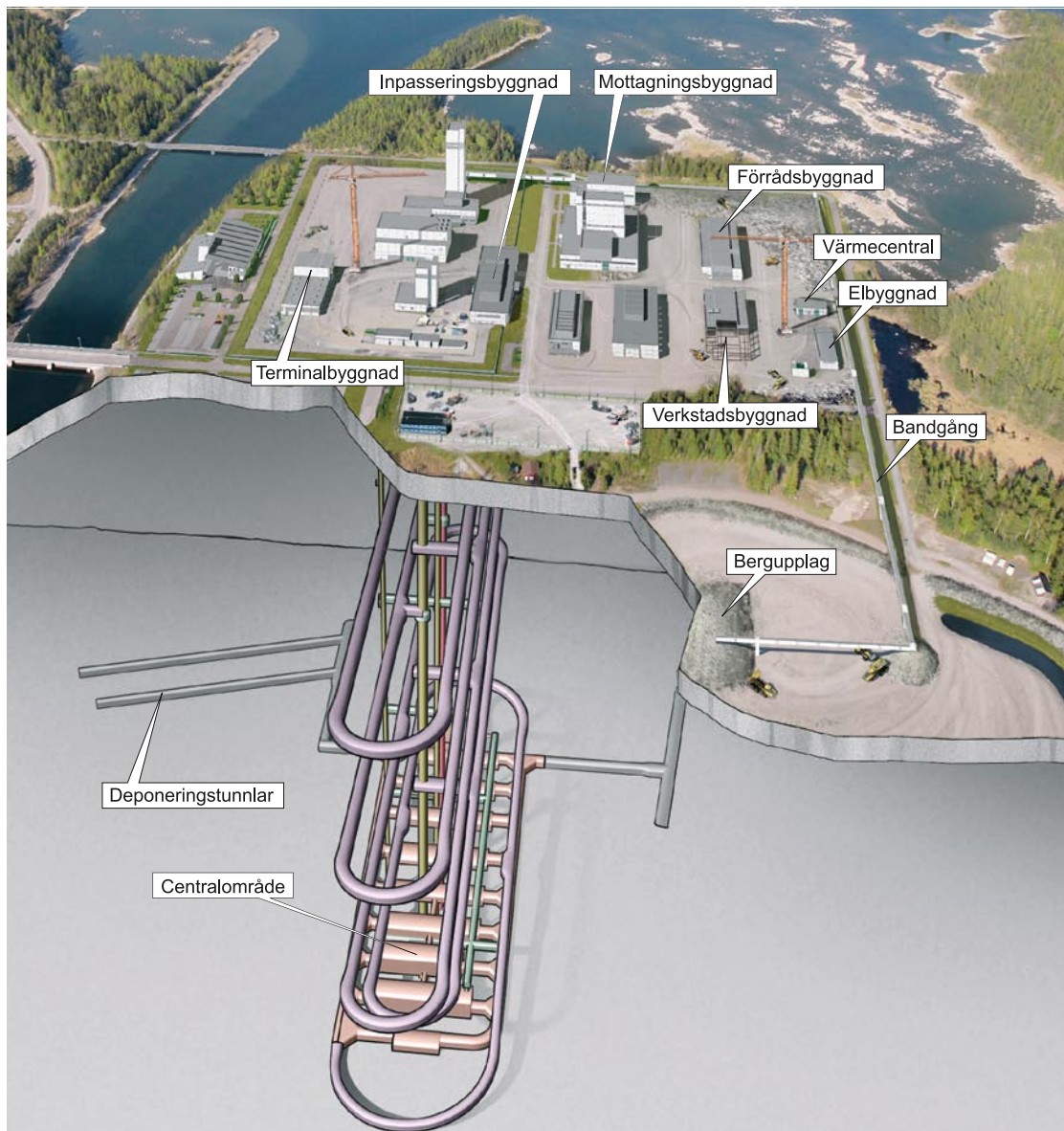


Figur 8-7. Slutförvarsanläggningen under den andra etappen av uppförandeskedet, cirka 4 år efter byggstart. Schakt och ramp har tagits i drift. Berguppföringen sker via skipschakt. Bygget av centralområdets bergrum inleds.

Anläggningarna ovan mark byggs i en takt som anpassas till underjordsarbetena. I första skedet görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor görs i ordning och byggprovisorier etableras. De första permanenta byggnaderna som uppförs är en entrébyggnad för rampnedfarten och en byggnad som behövs för undersökningsverksamheten (geologibygnad). Senare tillkommer schaktöverbyggnader, anläggningar för berghanteringen, produktionsbyggnad för buffert och återfyllnad, och i slutskedet övriga byggnader för drift och service.

8.4.3 Driftsättning

Driftsättningen av slutförvarets delsystem startar successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras. Tidsmässigt kommer uppförande- och driftsättningskedena att överlappa varandra. Exempelvis kommer uppföringssystemet för bergmassor (berglaststation, skipschakt med mera) att tas i drift innan de första deponeringstunnlarna ens är byggda.



Figur 8-8. Slutförvarsanläggningen under den tredje etappen av uppförandeskedet, cirka 6 år efter byggstart. Nedfarter och centralområde är färdigställda. Utbyggnad av ett första deponeringsområde pågår. Byggnader och anläggningar på driftområdet färdigställs.

Vid driftsättningen provas systemen, först vart och ett för sig och sedan gradvis mera samman-kopplade. Samtidigt som anläggningens delar driftsätts byggs driftorganisationen upp, och personalen utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrimningen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning, som innebär att hela anläggningen provas under driftsmässiga förhål-landen. Då genomförs alla moment i verksamheten, inklusive deponering av ett antal kapslar, dock utan innehåll av använt kärnbränsle, i det första deponeringsområde som byggts under senare delen av uppförandeskedet. Samfunktionsprovningen avslutas med att hela slutförvarssystemet, med inkapslingsanläggning, transporter och slutförvarsanläggning provas integrerat.

Driftsättningsskedet avslutas när SKB får tillstånd för provdrift av slutförvarssystemet. Målet är att alla funktioner och resurser samt utrymmen för deponering då ska finnas tillgängliga så att provdriften kan inledas.

8.4.4 Arbetsmetodik under uppförande och driftsättning

I planeringen ingår att ta fram strategi, metodik och program för ledning och styrning av verksamheten, hantering av informationsflöden med mera, i olika skeden av projektering, bygge och driftsättning av slutförvarsanläggningens delar. En lägesrapport från detta planeringsarbete redovisades i Fud-program 2007. Sedan dess har strategi och metodik vidareutvecklats, och det färdiga resultatet kommer att redovisas i underlaget för ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken. Här sammanfattas några huvuddrag.

Det övergripande målet för uppförande och driftsättning är att SKB kan ansöka om att få ta slutförvarsanläggningen i drift. För att det ska vara möjligt måste följande ha uppnåtts:

- Slutförvarsanläggningen är uppförd och driftsatt. I detta inkluderas även att anläggningsdokumentationen är komplett samt att driftorganisation och administrativa rutiner är på plats och intrimmade.
- Säkerhetsredovisningen är förnyad, på det sätt som krävs inför ansökan om provdrift.

Allt som görs under uppförande och driftsättning strävar mot ett eller båda av dessa mål. I linje med detta har verksamheten delats upp i två iterativa huvudprocesser:

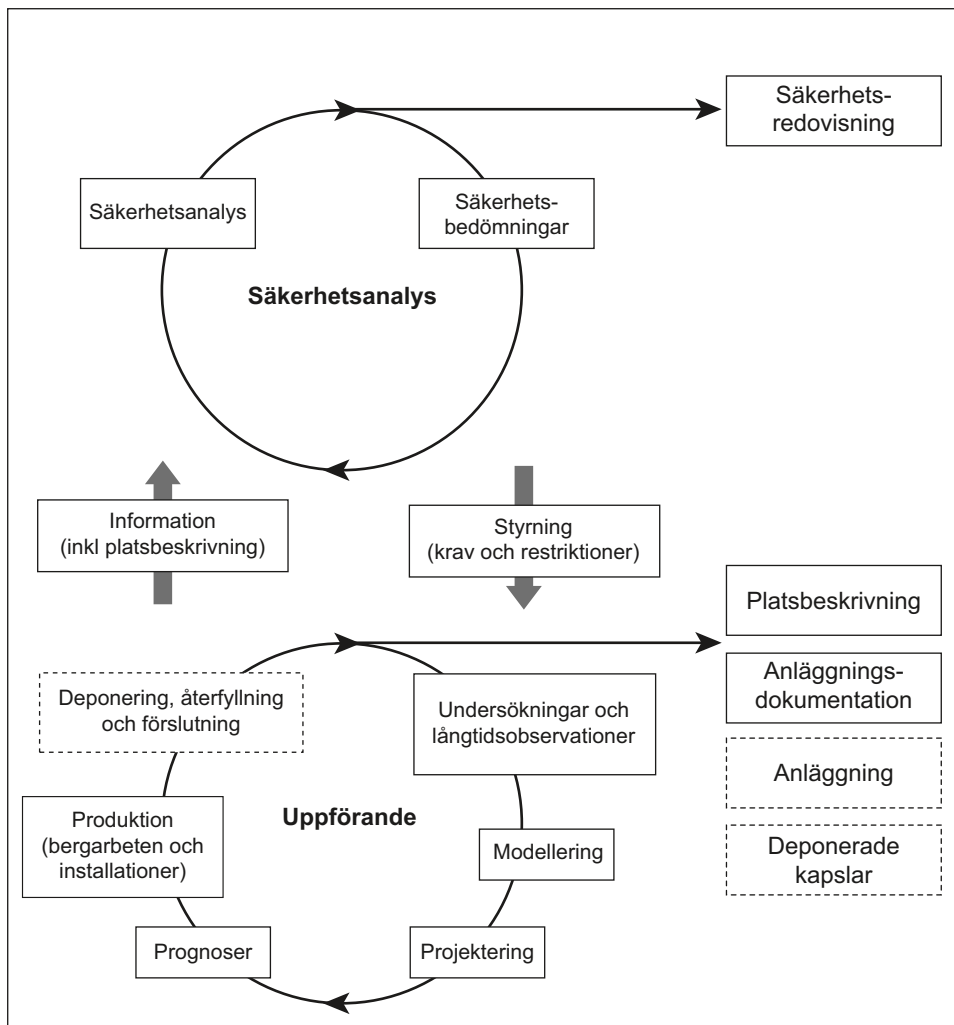
- Säkerhetsanalys
- Uppförande

Processerna med ingående komponenter och kopplingar illustreras i figur 8-9. Inom huvudprocess Säkerhetsanalys samlas den verksamhet som syftar till att ta fram en förnyad säkerhetsredovisning, inför ansökan om provdrift. Startpunkten är den platsbeskrivning som togs fram efter avslutad platsundersökning samt säkerhetsanalysen SR-Site. Regelbundna avstämningar och eventuella uppdateringar görs sedan med ledning av information som huvudprocessen Uppförande producerar bland annat genom de detaljundersökningar som görs. Säkerhetsbedömningar kan behövas exempelvis inför en ny utbyggnadsetapp, för att kontrollera att planerad utformning och utförande möter konstruktionsförutsättningar med avseende på långsiktig säkerhet. Omvänt kan Säkerhetsanalys ge styrning i form av krav och restriktioner som måste beaktas för att uppförandet ska resultera i ett säkert slutförvar.

Inom huvudprocess Uppförande samlas all verksamhet som behövs för att anläggningen ska bli uppförd. Heldragna rutor i figur 8-9 visar de komponenter som ingår under uppförandeskedet. Avsikten är att tillämpa samma processer under driftskedet, men då tillkommer komponenter som indikeras med streckade rutor i figuren. Under uppförandeskedet består verksamheten av undersökningar inklusive långtidsobservationer, modellering, projektering med prognoser för byggande, samt produktion i form av bergarbeten, montage etc. Under driftsättningsfasen tillkommer bland annat anläggningsdokumentation och organisatoriska förberedelser för driften.

Metodiken för huvudprocessen Uppförande enligt figur 8-9 gäller i första hand berganläggningarna och är en tillämpning av bergbyggande enligt den så kallade observationsmetoden. Bakgrunden är det faktum att de exakta bergförhållandena där anläggningsdelarna ska byggas inte kan fastställas fullständigt i förväg. Därför måste det finnas verktyg för att inhämta information från såväl undersökningar som direkta kontroller och erfarenheter från byggarbetena. Denna information måste sedan kunna tolkas så att den via projektering och byggprognoser kan omsättas till anpassning av byggtekniken eller utformningen av anläggningarna. Observationsmetoden syftar till att systematisera detta iterativa arbetssätt. Det ställer stora krav på väl fungerande informations- och arbetsflöden, men även på förmågan att tolka och förstå informationen så att rätt åtgärder kan vidtas. Den dagliga tillämpningen kan exempelvis innebära att insatser för bergförstärkning och tätning med kort framförhållning planeras med stöd av löpande information från bergarbetena. På längre sikt används samma princip för etappvis utbyggnad av anläggningen, där varje etapp detaljprojekteras med hänsyn till den senaste kunskapen från undersökningar och erfarenheter från tidigare etapper.

Även den ömsesidiga styrningen mellan huvudprocesserna kan till viss del hanteras inom observationsmetodens tillämpning. Om informationen påkallar omfattande förändringar som innebär revisioner av platsbeskrivningar och säkerhetsanalyser krävs dock hantering på mera övergripande beslutsnivåer.



Figur 8-9. Huvudprocesserna Säkerhetsanalys respektive Uppförande, med ingående komponenter; arbetsflöden och viktiga samband. Streckade komponenter tillkommer när slutförvarsanläggningen tas i drift.

9 Översikt – teknikutveckling

SKB bedriver teknikutveckling för att kunna bygga och driva slutförvarssystemet så att kraven på långsiktig säkerhet, låg stråldos vid arbete i anläggningen samt god yttre miljö uppfylls. I detta kapitel redovisas hur teknikutvecklingen styrs för att säkerställa att teknik som uppfyller ställda krav levereras i takt med Kärnbränsleprogrammets behov under uppförande och driftsättning. Kapitlet ger också en översikt av mål och omfattning för teknikutvecklingen avseende de olika barriärerna. Det konkreta utvecklingsarbetet redovisas sedan i efterföljande kapitel.

Utvecklingsarbetet kräver omfattande tekniska resurser. SKB:s egna laboratorier – Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet – är byggda och utrustade för tester, demonstrationer och generalrepetitioner i full skala. Huvuddelen av denna typ av utvecklingsinsatser kommer därför att utföras vid dessa anläggningar. Andra möjligheter finns också, såsom Posivas demonstrationsanläggning Onkalo, belägen i Olkiluoto i Finland, som är under utbyggnad. Vidare finns laboratorier i berg och för metallurgisk forskning tillgängliga i Europa och övriga världen. Därtill kommer industrianläggningar i många länder, med kunskaper och resurser inom områden där SKB behöver göra utvecklingsinsatser.

Berggrunden i Forsmark skiljer sig i viktiga avseenden från den i Äspölaboratoriet. I Forsmark är bergspänningarna högre och vattengenomsläppligheten på förvarsdjup betydligt lägre än på Äspö. Dessa och andra skillnader behöver beaktas i utvecklingsarbetet, men hindrar inte att Äspölaboratoriet förblir SKB:s viktigaste resurs för forskning, utveckling och demonstration som kräver underjordsmiljö på relevant djup. Vidare intensifieras samarbetet med Posiva, och vissa försök kan komma att genomföras i Posivas Onkalo-anläggning, där bergförhållandena i flera avseenden liknar dem som råder i Forsmark. Inom flera områden, exempelvis tillverkning och kontroll av kapsel, borring av deponeringshål samt transportfordon och hanteringsmaskiner är utvecklingsarbetet mer eller mindre oberoende av skillnader i bergförhållanden.

9.1 Utgångspunkter

Den struktur med uppdelning av teknikutvecklingen i ett antal produktionslinjer som SKB presenterade i Fud-program 2007 har vidareutvecklats. Strukturen innebär att utvecklingsarbetet genomförs inom produktionslinjer för bränsle, kapsel, buffert, återfyllnad, förslutning och bergutrymmen. Vidare utvecklas övergripande system för exempelvis logistik samt maskiner som är unika för slutförvarsanläggningen och som därmed inte finns att tillgå på marknaden.

Teknikutvecklingen har nu nått så långt att en referensutformning för KBS-3-systemet är fastställd och har visats uppfylla de konstruktionsförutsättningar som tagits fram. Samtidigt har en genomförbar väg mot produktion och kontrollprogram påvisats. Fortsatt teknikutveckling behövs när vi nu går från principlösningar till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process med fastställda krav på kvalitet, kostnad och tidsåtgång.

Teknikutvecklingen har kommit längst för komponenter av avgörande betydelse för den långsiktiga säkerheten, som utformningen av kapseln. För vissa komponenter, även för kapseln, kan utformningen behöva modifieras, åtminstone i detaljer. Vidare undersöks möjligheterna att ytterligare förbättra utformningen för att kunna förenkla det tekniska genomförandet med bibehållen eller förbättrad säkerhet.

9.1.1 Konstruktionsförutsättningar

Teknikutvecklingen ska leverera lösningar för konstruktion och platsanpassning av Clink och Kärnbränsleförvaret. Lösningarna ska uppfylla konstruktionsförutsättningar såväl avseende långsiktig säkerhet som med hänsyn till att de olika barriärerna ställer krav på varandra.

SKB:s gällande konstruktionsförutsättningar avseende långsiktig säkerhet ”Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses” /9-1/ baseras i huvudsak på slutsatser från säkerhetsanalysen SR-Can samt ett antal kompletterande analyser. Förnyade säkerhetsanalyser kan föranleda förtydliganden eller revideringar av konstruktionsförutsättningarna. En första revision genomförs, när ansökningarna lämnats in, utifrån de slutsatser och rekommendationer som kommer att framgå av SR-Site.

Ett exempel på konstruktionsförutsättningar betingade av att de olika barriärerna ställer krav på varandra är toleranskravet för deponeringshålets dimensioner. Dimensionerna på de förkompakterade buffertblocken innebär att deponeringshålets dimensioner måste ligga inom vissa toleranser för att buffertdensiteten ska hamna inom tillåtet intervall. Denna typ av konstruktionsförutsättningar redovisas för de olika produktionslinjerna och kan behöva revideras om referensutförningen ändras.

9.1.2 Platsanpassade lösningar

Valet av Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret innebär att det nu är möjligt att inrikta den fortsatta teknikutvecklingen mot de förhållanden som råder där. Vi behöver inte längre ägna oss åt lösningar som ska fungera under olika bergförhållanden. Den låga frekvensen av vattenförande sprickor innebär att vissa moment som varit och är föremål för teknikutveckling bör kunna förenklas eller slopas. Det gäller exempelvis arrangemang för att hantera vatten i deponeringshålen. Den bergtekniska utvecklingen kan inriktas på bergarbeten i en miljö med sprickfattigt och relativt hårt belastat berg.

9.2 Styrning och redovisning

Ansvaret för styrning av teknikutvecklingen inom de olika produktionslinjerna ligger hos Kärnbränsleprogrammets beställarfunktion som har till uppgift att:

- Utveckla och förvalta de krav och konstruktionsförutsättningar som styr teknikutvecklingen.
- Samordna arbetet mellan de olika linjerna så att KBS-3-systemet som helhet uppfyller kraven avseende långsiktig säkerhet och drift.
- Styra utvecklingen efter de behov som de två anläggningsprojekten för Clink och Kärnbränsleförvaret har vad gäller hur långt olika delar måste ha utvecklats vid olika tidpunkter för att utgöra underlag för projektering, uppförande, installationer och funktionstester.

För att åstadkomma denna styrning tillämpar SKB en systematisk kravhantering, se avsnitt 1.5. Det innebär att beslut om att ändra lösningar i förhållande till gällande referensutförning eller referensverksamhet sker på ett systematiskt och styrt sätt. Syftet är att säkerställa att alla arbetar utifrån samma förutsättningar. Referensutförning och referensverksamhet definieras som de lösningar som gäller vid ett visst tillfälle och som alla som arbetar med utveckling av anläggning och teknik ska använda som förutsättningar, med undantag endast för utredningar av alternativa utförningar. Alla uppdrag för de olika produktionslinjerna definieras i enlighet med en leveransstyrmodell för teknikutvecklingen (se avsnitt 9.2.1).

Alla resultat från teknikutvecklingen inom produktionslinjerna utgör underlag för säkerhetsredovisningen för inkapslingsanläggning och slutförvar. Resultat och utförande ska därför uppfylla krav på kvalitetssäkring, spårbarhet och dokumenterad värdering av kravuppfyllelse. Hur detta sker framgår av SKB:s ledningssystem.

9.2.1 Leveransstyrmodell

SKB har tagit fram en metodik för styrning av teknikutvecklingen inom Kärnbränsleprogrammet, en leveransstyrmodell. Metodiken går ut på att precisera vilken mognadsgrad utvecklingen av olika komponenter ska ha uppnått inför milstolparna byggstart, start utbyggnad av första deponeringsområdet (Kärnbränsleförvaret) alternativt sammankoppling av Clab och Inka (Clink), start samfunktionsprovning samt driftstart. Leveransstyrmodellen syftar således till att förtydliga hur

teknikutvecklingens olika komponenter kopplar till genomförandet av slutförvarssystemet. Vidare ska leveransstyrmodellen säkerställa att beställarna ger utförarna tydligt preciserade uppdrag så att rätt saker levereras i förhållande till kraven och de två uppförandeprojektens behov.

Grundtanken bakom modellen är att utvecklingen indelas i ett antal faser och att det för varje fas finns en specifikation för vad som ska ha uppnåtts och således vad som ska föreligga som underlag för beslut att gå vidare till nästa fas. Jämfört med de leveransplaner för teknikutvecklingen som redovisades i Fud-program 2007 innebär detta en striktare och för alla utvecklingsområden gemensam systematik och etappindelning av arbetet.

Leveransstyrmodellen indelar teknikutvecklingen i följande faser, se även figur 9-1:

- **Konceptfas:** Syftet med konceptfasen är att specificera kraven på delsystemet eller komponenten, göra en bred utvärdering av tänkbara lösningar och föreslå en eller flera tekniska lösningar att gå vidare med i nästa fas. Det innebär att en referensutformning (eller flera alternativa referensutformningar) för delsystemet ska kunna fastställas, att det påvisats hur denna (dessa) kan verifieras mot de konstruktionsförutsättningar som angetts inför konceptfasen, samt att en genomförbar väg mot produktion och kontrollprogram har påvisats.
- **Konstruktionsfas:** Syftet med konstruktionsfasen är att ta fram en konstruktion av delsystemet eller komponenten, att verifiera att den uppfyller kraven samt att ta fram förslag avseende produktion, kontroll och underhåll av delsystemet/komponenten. Konstruktionsfasen kan vara iterativ då det kan visa sig att föreslagen lösning inte uppfyller kraven, inte kan produceras, eller inte kan kontrolleras på ett effektivt sätt. Konstruktionsfasen består i regel av två etapper, en inledande systemkonstruktion och en avslutande detaljkonstruktion.
- **Implementeringsfas:** Syftet med implementeringsfasen är att bygga upp produktions- och kontrollsystem. Denna fas innefattar också den dokumentation inklusive eventuell licensiering som behövs för drift av delsystemet/komponenten. Målet med implementeringsfasen är att systemet/komponenten ska vara intrimmat och klart att överlämna till driften.
- **Förvaltningsfas:** Förvaltningsfasen börjar när systemet/komponenten tagits i drift. Målet med denna fas är att på ett strukturerat sätt tillvarata drifterfarenheter och ge underlag för eventuella modifieringar av såväl produktionsapparat som produkt. Om och när det är motiverat initieras ett ändringsärende/projekt.

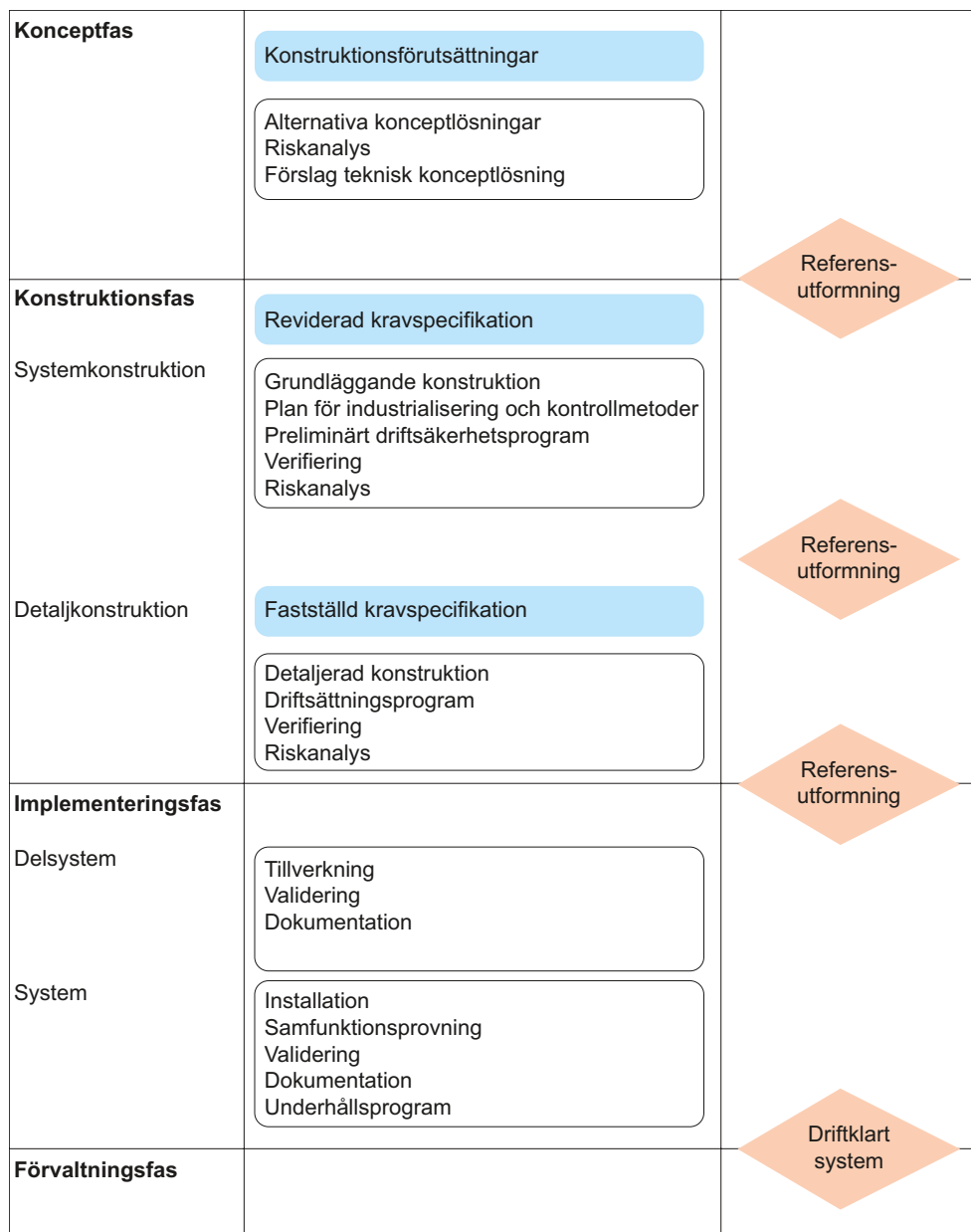
I och med att SKB lämnar in ansökningar om att få uppföra och driva slutförvarssystemet har teknikutvecklingen i princip passerat konceptfasen. För vissa delar har utvecklingen kommit väsentligt längre. Inför samfunktionsprovingen ska utvecklingen av alla system och komponenter för driften vara i slutet av implementeringsfasen.

9.2.2 Rapportering

Resultaten från teknikutvecklingen dokumenteras av utföraren och rapporteras till beställaren, som underlag till säkerhetsredovisningen. Där anges referensutformning, visas att referensutformningen uppfyller angivna konstruktionsförutsättningar, redovisas hur referensutformningen kan åstadkommas med metoder för kontroll/verifiering av uppnådda resultat, samt redovisas initialtillstånd för de olika barriärerna. I ansökningarna för uppförande och drift av slutförvarsanläggningen görs denna redovisning i så kallade linjerapporter.

9.3 Behov av teknikutveckling

När SKB lämnar in ansökningarna för Kärnbränsleförvaret och Clink ska teknikutvecklingen, med leveransstyrmodellens definition, minst ha uppnått målen för konceptfasen. Referensutformningar som uppfyller konstruktionsförutsättningarna ska ha redovisats och genomförbara vägar mot produktion och kontrollprogram ska ha anvisats. För många delsystem återstår ett betydande konstruktionsarbete innan de är redo för implementering. Utvecklingsbehoven diskuteras översiktligt i de avsnitt som följer och sammanfattas i tabell 9-1.



Figur 9-1. Leveransstyrmodell för SKB:s teknikutveckling.

9.3.1 Övergripande behov

I linjerapporterna, som utgör underlag till ansökningarna om uppförande och drift av slutförvarsanläggningen, avser SKB att visa att den valda referensutformningen uppfyller konstruktionsförutsättningarna. I det fortsatta utvecklingsarbetet är det viktigt att inrikta insatserna på lösningar som är effektiva för det integrerade systemet. Detta aktualiserar ett antal linjeövergripande utvecklingsfrågor. Dessutom innebär den metodik som valts för att ta fram konstruktionsförutsättningar med avseende på säkerheten att dessa förutsättningar uppdateras när en säkerhetsanalys genomförs. Följande övergripande åtgärdsbehov har lagts fast:

- Efter varje större uppdatering av säkerhetsredovisningen uppdateras konstruktionsförutsättningarna utifrån säkerhetsredovisningens analyser och slutsatser. Den första revisionen kommer att avse de konstruktionsförutsättningar som finns publicerade i /9-1/. Den genomförs utifrån de slutsatser och rekommendationer som kommer att framgå av SR-Site och analysen av driftsäkerheten i slutförvarssystemet. Ytterligare revisioner görs om det senare tillkommer information som bedöms vara av betydelse för säkerheten.

- En integrerad kravbild tas fram för bränsle och kapsel, avseende bland annat toleranser för resteffekt och vatten i kapseln. Denna kravbild behöver föreligga inför systemkonstruktion av inkapslingsanläggningen.
- En samlad kravbild för tillfarter, samt för deponeringshål och deponeringstunnlar, tas fram. Syftet är att kunna tillåta lösningar som tar hänsyn till förhållandena i Forsmark, och som också är mer produktionsmässigt optimala. Det gäller till exempel krav på tillfarter, inflöden, geometri för sulan i deponeringstunneln, avfasningen av deponeringshål, toleranser för deponeringshål och buffert, samt förslutning.
- Integrerad produktionsanpassning avseende berguttag, kontrollprogram, deponering och återfyllning behöver göras. Arbetet omfattar att, från den vidareutvecklade integrerade kravbilden för slutförvarsanläggningens olika delar, tillse att de bygg- och produktionsprocesser som utvecklats inom de olika linjerna fungerar tillsammans på ett rationellt och effektivt sätt.
- Databasstrukturer och rutiner för informationsflödet i genomförandeprocessen utvecklas och underhålls. De är viktiga verktyg för redovisning och integration av kontrollprogram inom de olika linjerna och för att styrka att förvaret utformats i enlighet med fastlagda konstruktionsförutsättningar.

9.3.2 Bränslelinjen

I bränslelinjen redovisas de egenskaper hos det använda kärnbränslet som påverkar utformningen av Kärnbränsleförvaret och hur dessa egenskaper ska bestämmas. Utformningen av förvaret ställer i sin tur krav på valet av bränsleelement för inkapsling samt på hanteringen av bränslet. Parametrar som måste bestämmas genom mätningar eller beräkningar eller en kombination av mätningar och beräkningar är bland annat radionuklidinventarium, resteffekt, strålning, kriticitet samt mängden vatten i kapseln. Inventariet av radionuklider beror på bränslets anrikning, utbränning och avklingningstid. Mängden uran/HM har också betydelse. Det kan därför skilja sig mycket mellan bränsleelement med olika drifhistoria, men variationen begränsas av att bränsleelementen i en kapsel får ha en sammanlagd resteffekt på högst 1 700 W. Därmed är det möjligt att på ett förenklat sätt beräkna konsekvenserna för långsiktig säkerhet utan att dessa underskattas. De bränsleparametrar som påverkar hanteringen av bränslet och som behövs för analys av säkerheten har också betydelse för kärnkraftverkens säkra och effektiva drift. Program för beräkning av parametrarna finns därför tillgängliga redan i dag. SKB avser att använda samma eller samma typ av program.

Fortsatta utvecklingsinsatser handlar huvudsakligen om att ge underlag för utformning av inkapslingsprocessen. Vidare behövs insatser för att få mer detaljerad kunskap om bränslet. Det planerade utvecklingsarbetet omfattar följande områden:

- Fortsatta mätningar av resteffekt på enskilda bränsleelement i Clab. Syftet är bland annat att få ett bättre statistiskt underlag. Målet är att en mätmetod för bestämning av resteffekt ska vara utvecklad när inkapslingsanläggningen börjar byggas.
- Utredda olika tekniker för att torka bränslet i Clink, inklusive PWR-bränsle med styrstav. I insatsen ingår att inventera tänkbara tekniker, välja metod samt planera utvärderingen av den valda metoden. Målet är att kunna fatta beslut om metod för torkning inför detaljprojektering av Clink.
- Analysera sannolikheten för kriticitet i kapslar med udda bränsletyper, bland annat PWR-bränsle med hög anrikning och låg utbränning, samt utreda hur sådant PWR-bränsle ska hanteras.

Planerna för att möta dessa behov framgår av kapitel 10.

9.3.3 Kapsellinjen

Kapsellinjen ska visa att vald referensutformning för kapseln är tekniskt möjlig att åstadkomma och att den uppfyller ställda konstruktionsförutsättningar. Utvecklingen av kapseln har passerat konceptfasen och delar ligger långt inne i konstruktionsfasen.

Utvecklingen av de olika processerna för tillverkning av kapselkomponenter, svetsning för förslutning av kapseln samt kontroll av komponenter och svetsar har kommit olika långt. Kopparkomponenterna kan tillverkas med flera varmformningsmetoder. SKB har tillverkat komponenter som uppfyller krav på dimensioner, materialstruktur och materialsammansättning. Svetsning av kopparkomponenter med FSW (friction stir welding) har genomförts med hög reproducerbarhet och liten förekomst av defekter. Kapselinsatser för BWR-element kan i dag tillverkas med en kvalitet som med marginal uppfyller krav på dimensioner och materialegenskaper. Utveckling pågår för att nå motsvarande nivå på tillverkningstekniken för PWR-insatser. Metoderna för kontroll av kapslar vidareutvecklas i olika avseenden.

Det behövs även utveckling som underlag för mer detaljerade acceptanskriterier, industrialisering av provnings- och kontrollmetoder vid tillverkning och hantering i Clink samt utveckling och studier av hur kapseln hanteras och deponeras. Därvid ingår bland annat att anpassa processerna för svetsning och oförstörande provning (OFP) av förslutning till strålningsmiljön i Clink samt att fastställa provningsprocedur och verifiera tillförlitligheten för OFP av kapslar med ultraljud, samt ta fram teknik för att påvisa och storleksbestämma ytdefekter och ytdeformationer.

Det fortsatta utvecklingsarbetet inom kapsellinjen omfattar därför i huvudsak:

- Kapselutformning – analyser av kapseln.
- Tillverkning och provning av insatser.
- Tillverkning och provning av kopparkomponenter.
- Förslutning och provning av svetsen.
- Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret innefattande utveckling av rampfordon för nedtransport av kapseln till omlastningsstation i centralområdet samt vidareutveckling av deponeringsmaskinen.

9.3.4 Buffertlinjen

Buffertlinjen ska visa att vald referensutformning för bufferten uppfyller konstruktionsförutsättningarna och att den är tekniskt genomförbar. Utvecklingen av bufferten har passerat konceptfasen. En referensutformning har därmed lagts fast som uppfyller angivna konstruktionsförutsättningar.

Studier visar att det går att uppnå densitet och materialsammansättning hos pressade block och pellets inom de intervall som krävs enligt konstruktionsförutsättningarna. För extrema kombinationer av geometri hos deponeringshålen och densitet för buffertblock och pellets kan dock den vattenmättade densiteten för installerad buffert lokalt ligga utanför gränserna för acceptabelt densitetsintervall.

Med konventionell teknik bör det vara möjligt att ytterligare minska variationsbredden för densitet och materialsammansättning, vilket bedöms vara en fördel ur säkerhetssynpunkt även om inga formella krav har ställts upp. Det fortsatta utvecklingsarbetet inom buffertlinjen har primärt följande mål:

- Inom ramen för vald referensutformning utveckla utformningen och tekniken för installation av bufferten så att systemkonstruktion kan fastläggas innan byggstart och så att implementering kan inledas innan samfunktionsprovningen startar.
- Vidareutveckla metod och konstruera utrustning för att tillverka (pressa), bearbeta och hantera buffertblock, så att det är klart när systemkonstruktionen av produktionsbyggnaden påbörjas.

Därutöver finns ett antal utvecklingsfrågor som griper över hela systemet buffert, återfyllning och förslutning. Exempelvis skulle buffertinstallationen kunna förenklas genom att bottenplatta och buffertskydd tas bort, men det förutsätter att även deponeringssekvensen med återfyllningen modifieras. Följande insatser planeras:

- Bryta yttre sektionen av prototypförvaret vid Äspölaboratoriet. Syftet med denna demonstration i full skala är att komplettera kunskapen om hur buffert, plugg och återfyllning fungerar.
- Utredda och värdera alternativa metoder för deponering och återfyllnadssekvenser.
- Utveckla system och utrustning för transport av buffert och återfyllnadsmaterial mellan produktionsbyggnad och aktuellt deponeringsområde i förvaret.

Planerna för att möta dessa behov framgår av kapitel 12. Det finns därutöver behov av fortsatta modellstudier och experiment för att få tillräcklig förståelse för viktiga processer i systemet buffert, återfyllning och plugg, se kapitel 24. Det gäller möjlig erosion av buffert innan full vattenmättnad har uppnåtts, samt vattenmättnad, självläkning och homogenisering för buffert och återfyllning. Målen är att dels kunna bestämma utvecklingen av densitet och svälltryck för det samverkande systemet buffert, återfyllning och plugg för tiden mellan installation och förvarets förslutning, dels att kunna formulera mera praktiskt användbara konstruktionsförutsättningar för dessa systemdelar.

9.3.5 Återfyllnadslinjen

Återfyllnadslinjen ska visa att vald referensutformning för återfyllningen är tekniskt möjlig att åstadkomma och att den uppfyller angivna konstruktionsförutsättningar. Utvecklingen av återfyllningen har passerat konceptfasen. De förväntat mycket låga inflödena av grundvatten i Forsmark bör kunna möjliggöra en enklare installation av återfyllningen.

Även för utformning av pluggar återstår utvecklingsarbete. Det gäller bland annat vilka täthetskrav som behöver ställas för att säkerställa ett kontrollerat svällningsförlopp hos återfyllningen och för att i tillräcklig grad förhindra så kallad ”piping erosion” i buffert och återfyllning.

Förutom de övergripande mål för hela systemet buffert, återfyllning och förslutning som redovisas i avsnitt 9.3.4 har det fortsatta utvecklingsarbetet inom återfyllnadslinjen primärt följande mål:

- Slutföra konstruktionen av återfyllningen inom vald referensutformning så att systemkonstruktion kan fastläggas innan byggstart och så att implementering kan inledas innan samfunktionsprovet startar.
- Slutföra konstruktion av pluggen för deponeringstunnlar så att systemkonstruktion kan fastläggas innan byggstart och så att implementeringsfasen har uppnåtts innan samfunktionsprovet inleds.

Planerna för att möta dessa behov framgår av kapitel 13.

9.3.6 Förslutningslinjen

Med undantag för vissa borrhål kommer förslutning av förvaret inte att påbörjas förrän allt använt bränsle har deponerats. Detaljkonstruktion och implementering av förslutningstekniken är därför inte aktuellt förrän om mer än 50 år. Nu gällande referensutformning, som i väsentliga delar bygger på referensutformningen för återfyllningen, kommer därför sannolikt att modifieras och förenklas så att den svarar mot de lägre krav som bör gälla för förslutningen jämfört med återfyllningen. Det gäller både materialsammansättning och geometrisk konfiguration. De krav som behöver ställas på berguttaget i delar av tillfarterna utgör ett viktigt undantag. Dessa behöver fastläggas innan byggstart för att säkerställa att utformningen och produktionen av tillfarterna möjliggör en ändamålsenlig förslutning.

Förutom de övergripande mål för hela systemet buffert, återfyllning och förslutning som redovisas i avsnitt 9.3.4 har det fortsatta arbetet med teknikutveckling inom förslutningslinjen primärt följande mål:

- Vidareutveckla referensutformningen för förslutning av förvaret, i första hand för att innan byggstart fastställa krav på berguttag i tillfarter. En ny konceptfas genomförs. Efter reviderad referensutformning tar utvecklingsinsatser som underlag för systemkonstruktion vid.

Planerna för att möta dessa behov framgår av kapitel 14.

9.3.7 Berglinjen

Berglinjen ska visa att vald referensutformning av Kärnbränsleförvarets bergutrymmen är tekniskt möjlig att åstadkomma och att den uppfyller angivna konstruktionsförutsättningar. För ett fåtal konstruktionsförutsättningar återstår osäkerheter som kräver fortsatt teknikutveckling. Vidareutveckling behövs även för att omsätta resultat från försök och demonstration i full skala till industriell process.

Projektering och byggande av berganläggningarna kommer att göras med hjälp av observationsmetoden. Tillämpningen av denna metod behöver vidareutvecklas för att säkerställa att förvaret platsanpassas med hänsyn till krav på långsiktig säkerhet samt att metodiken blir ändamålsenlig för Kärnbränsleförvaret. Tillämpningen förutsätter ett antal i förväg stipulerade regler för hur geovetenskaplig information ska tolkas och beslut fattas, exempelvis beträffande acceptans av tillänkta deponeringspositioner.

Det viktigaste underlaget för dimensionering av bergutrymmen och platsanpassning av layouten är resultaten från detaljundersökningar, med tillhörande modellering. Tillgänglig teknik för undersökningar och modellering behöver i vissa delar vidareutvecklas. Detaljundersökningar kommer att utföras i steg inför och under pågående byggproduktion, och samordningen mellan dessa verksamheter behöver klarläggas. Det behöver också säkerställas att behoven för säkerhetsredovisningen tillgodoses.

Industrialiseringen av bergbyggnadsprocessen omfattar produktionsmetoder som är anpassade till de krav som ställs för berguttag, stadga och täthet. De konstruktionsmaterial som används måste uppfylla krav med hänsyn till långsiktig säkerhet. Det gäller främst kravet på lågt pH för cementbaserade material som injekteringsbruk, sprutbetong, bultbruk och konstruktionsbetong.

Inom området maskiner behöver bland annat tunneldrivningsaggregat med hög borrhprecision, injekteringsutrustningar, maskiner för bergförstärkning med nätning samt bormaskin för deponeringshåll vidareutvecklas. Erfarenheter från försök vid Äspölaboratoriet visar att de maskiner som finns för berguttag och injektering i tillfarter, i första hand tunneldrivningsaggregat och injekteringsutrustning, har förutsättningar att klara de krav som ställs för slutförvarets tillfarter.

Utveckling av planer för leveranskontroller av byggnadsmaterial samt utförande- och resultatkontroller av bergarbetena är en viktig del för att verifiera att angivna krav uppnåtts. Detta är en integrerad del av industrialiseringen av bergbyggnadsprocessen som ska vara fastställd när bergarbetena för förvarets tillfarter startar. Dokumentation av var och hur tunnlarna uppförts kommer att vara viktigt underlag för bland annat kommande säkerhetsredovisning.

Det fortsatta utvecklingsarbetet inom berglinjen har primärt följande mål:

- Vidareutveckla metodiken för bergprojektering och tillämpningen av observationsmetoden, i första hand avseende strategier för detaljanpassning av deponeringsområden och samordning av detaljundersökningar och byggproduktion.
- Vidareutveckla metoder och utrustning för detaljundersökningar med tillhörande modellering så att detaljundersökningsprogrammet redan från byggstart kan genomföras på ett rationellt och effektivt sätt.
- Vidareutveckla produktionsmetoder anpassade till de krav som ställs för berguttag, stadga och täthet. Målet är i första hand att kunna ange utförandekrav i bygghandlingarna för tillfarterna.
- Säkerställa att godkända och tillräckligt beprövade konstruktionsmaterial är tillgängliga i tid för bygget av tillfarterna.
- Säkerställa att de specialmaskiner som behövs, bland annat tunneldrivningsaggregat med hög borrhprecision, injekteringsutrustningar samt maskiner för bergförstärkning med nätning finns tillgängliga i tid.
- Utveckla bormaskin för deponeringshåll så att den finns tillgänglig när första deponeringsområdet byggs.
- Utveckla kontrollplaner, inklusive format och rutiner för dokumentation och för relationshandlingar, så att dessa är utvärderade och fastställda när de första bergarbetena startar.

Planerna för att möta dessa behov framgår av kapitel 15.

9.3.8 Produktionssystem och logistik

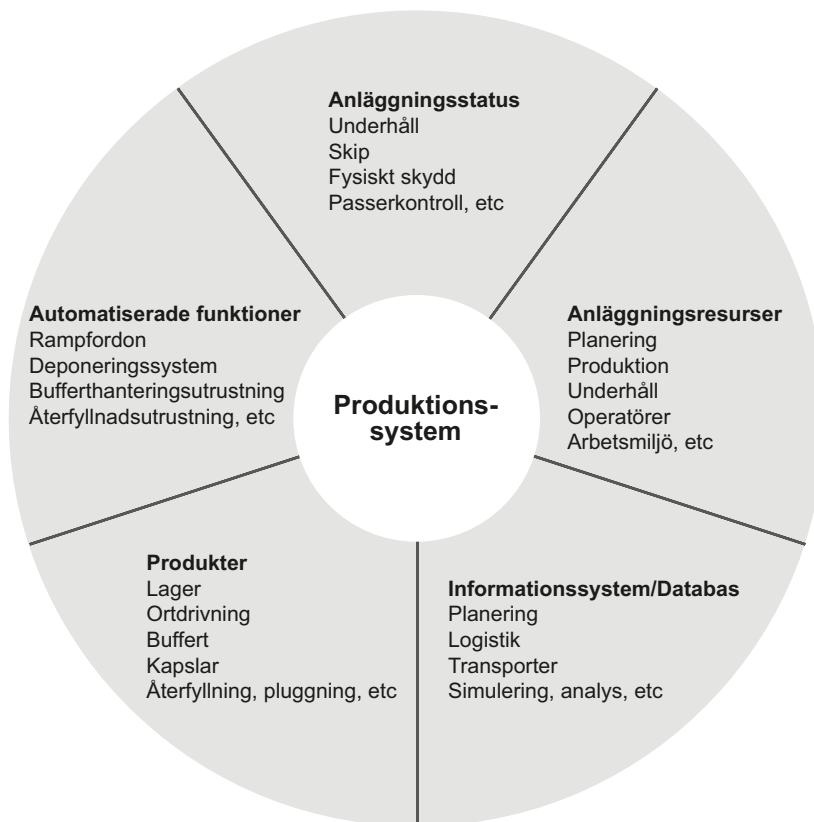
I Kärnbränsleförvaret kommer många verksamheter och materialflöden att pågå parallellt i både tid och rum. För att kunna planera, koordinera och styra dessa på ett effektivt sätt behövs ett övergripande produktionssystem. Avancerade produktionssystem finns och används inom många industribranscher. Likheterna mellan slutförvarsanläggningen och en gruva gör att system som används inom gruvindustrin är särskilt intressanta för SKB:s del.

Det produktionssystem som SKB planerar kan indelas i fem delområden enligt figur 9-2. Benämningar på och omfattning av systemets delområden är ännu inte fastställda utan kommer att utvecklas under det fortsatta arbetet med projektering och konstruktion.

I slutförvarsanläggningen ska stora mängder material och produkter hanteras. Detta kräver en väl fungerande logistik. Parallellt med projekteringen av anläggningen studeras och utvecklas därför verktyg för logistiksimulering. Syftet är att ta fram en modell som kan simulera logistiken för all verksamhet vid slutförvarsanläggningen under driftskedet, det vill säga både för fortsatt utbyggnad och deponeringsverksamhet.

Logistikmodellen delas upp i delmodeller på det sätt som illustreras i figur 9-3. Ytterligare nedbrytning kommer dock att krävas för att göra modellen hanterlig. Gränssnitten mellan de olika delmodellerna är viktiga. Delmodellerna kan utvecklas i olika takt efterhand som underlag finns framme.

För att logistikmodellen enkelt ska kunna förmedla information till dem som arbetar med olika delar av verksamheten inom anläggningen måste programvaran för logistiksimulering kunna använda de 3D-modeller av anläggningen samt olika fordon och utrustningar som tas fram inom projekteringsarbetet.



Figur 9-2. Preliminär struktur för produktionssystemet för slutförvarsanläggningen.

Hargshamn

Mottagning av buffert- och återfyllnads-material från fartyg, mottagningskontroll, uttransport på lastbil

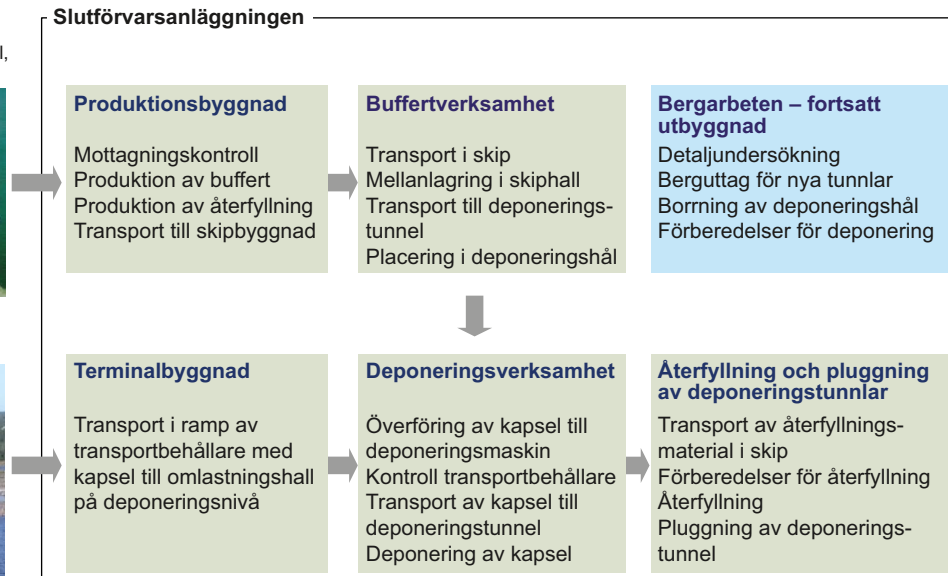


Forsmarks hamn

Mottagning av transportbehållare från fartyg, uttransport på terminalfordon



Slutförvarsanläggningen



Figur 9-3. Principbild av logistikmodellen för slutförvarsanläggningen.

Under 2009 inventerades programvaror som kunde uppfylla SKB:s krav att kunna både simulera och planera verksamheten. Baserat på inventeringen valdes ett program för fortsatta studier. Därefter har SKB genomfört ett demonstrationsprojekt för att visa att det valda programmeringsverktyget har förutsättningar att ge önskade resultat. Efter utvärdering av demonstrationsprojektet planeras fortsatta logistikstudier i de steg och i den takt som det kommer fram underlag. Arbetet kommer att fokusera på att analysera flöden av material, maskiner, fordon och personal inom anläggningen, strukturera denna information i en databas, utveckla grundmodellen från demonstrationsprojektet, samt klarställa gränssnitt mellan ingående delmodeller. Delmodellerna kan sedan utvecklas var för sig, men i slutskedet ska det vara möjligt att simulera all verksamhet vid slutförvarsanläggningen.

9.3.9 KBS-3H

Tillsammans med Posiva studerar SKB om horisontell deponering kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering. I slutet av 2007 redovisades det arbete som utförts under åren 2004–2007 /9-2/. Baserat på de resultat som uppnåtts beslutade SKB och Posiva att fortsätta utvecklingsarbetet, med huvudmålet att utveckla tekniken för KBS-3H så långt att det i en senare etapp är möjligt att demonstrera tekniken i full skala. Arbetet inleddes år 2008 och programmet för de närmaste åren omfattar följande huvudaktiviteter:

- Utformning av ett KBS-3H-förvar.
- Demonstration vid Äspölaboratoriet.
- Studier av nyckelfrågor med hänsyn till långsiktig säkerhet.

Planer för dessa aktiviteter framgår av kapitel 16.

9.3.10 Sammanfattning

Tabell 9-1 sammanfattar hur långt teknikutvecklingen inom olika områden ska ha nått, i relation till angivna viktiga milstolpar för genomförandeprogrammet enligt figur 8-1.

Tabell 9-1. Planerad status för teknikutvecklingen inför olika etapper av uppförande och driftsättning.

Utvecklingsbehov	Inför byggstart	Inför utbyggnad av deponeringsområden – sammankoppling Clink	Inför samfunksionsprovning	Inför driftstart
Linjeövergripande				
Konstruktionsförutsättningar avseende driftsäkerhet och långsiktig säkerhet.	Reviderade med hänsyn till resultat från säkerhetsanalyser.	Eventuell revision om ny kunskap av betydelse för säkerheten har tillkommit.		
Integrerad kravbild för bränsle och kapsel avseende bland annat toleranser för resteffekt och vatten i kapseln.	Klart i tid för systemkonstruktion av inkapslingsanläggningen.			
Vidareutvecklad, samlad kravbild för tillfarter, samt för deponeringshål och deponeringstunnlar.	Kravbild reviderad i tid för systemprojektering av Kärnbränsleförvaret.	Kravbild reviderad i tid för detaljprojektering av deponeringsområde.	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
System för Informationshantering i genomförandeprocessen.	Detaljkonstruktion slutförd.	Implementering slutförd	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Verktyg för produktionsstyrning och logistik.	Systemkonstruktion slutförd.	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Bränslelinjen				
Mätmetod för bestämning av resteffekt och andra bränsleparametrar.	Implementering slutförd vid byggstart för inkapslingsanläggningen.	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Metod för att torka bränsle.	Metod vald inför detaljprojektering av Clink.	Konstruktion pågår	Implementering pågår	Förvaltning och förbättring
Kriticitetsanalyser för PWR-bränsle med hög anrikning och låg utbränning.	Valt alternativ för hantering av sådant bränsle redovisas i ansökan om utbränningskreditering för Clab.	Implementering pågår	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Kapsellinjen				
Utformning och analys av kapseln.	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Metoder och utrustning för tillverkning och provning av insatser.	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering pågår	Förvaltning och förbättring
Metoder och utrustning för tillverkning och provning av kopparkomponenter.	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering pågår	Förvaltning och förbättring
Metoder och utrustning för svetsning och OFP av svetsar.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Inkapslingsprocess med nuklearisering, inklusive svets och OFP.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Specialmaskiner: Rampfordon och deponeringsmaskin.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Buffertlinjen				
Vidareutveckling av bufferten inom vald referensutformning.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Metod och utrustning för att tillverka bentonitblock och pellets.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Fullskaledemonstration av funktionen hos buffert och återfylld tunnel.	Brytning av prototypförvaret slutförd.			
Alternativa metoder för deponering och återfyllnadsekvenser.	Konceptfas slutförd. Eventuellt beslut om ändrad referensutformning.			
Kvantitativ beskrivning av utvecklingen av densitet och svälltryck för det samverkande systemet buffert, återfyllning och plugg för tiden mellan installation och förvarets förslutning.	Underlag för eventuell revidering av konstruktionsförutsättningar för återfyllnad och plugg klart.			

Utvecklingsbehov	Inför byggstart	Inför utbyggnad av deponeringsområden – sammankoppling Clink	Inför samfunktionsprovning	Inför driftstart
Transportsystem för buffert och återfyllnadsmaterial.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Återfyllnadslinjen				
Vidareutveckling av återfyllningen inom vald referensutförning.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Plugg för deponeringstunnel.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Förslutningslinjen				
Referensutförning samt installationsmetod för förslutning.	Krav på berguttag i tillfarter fastställda.	Systemkonstruktion påbörjad	Systemkonstruktion pågår	Systemkonstruktion slutförd
Berglinjen				
Metodik för bergprojektering.	Metodik avseende tillfarter klar för implementering.	Metodik avseende deponeringsområde klar för implementering.	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Verktyg för detaljundersökningar.	Instrument och metoder för undersökningar i tillfarter klara att implementeras.	Instrument och metoder för undersökningar i deponeringsområde klara att implementeras.	Förvaltning och förbättring.	Förvaltning och förbättring
Utförandemetoder, byggnads-material och specialmaskiner.	Metoder etc för tillfarter klara att implementeras.	Metoder etc för deponeringsområde klara att implementeras.	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring
Borrmaskin för deponeringshål.	Systemkonstruktion slutförd	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering pågår	Implementering slutförd
Verktyg för datahantering och visualisering.	Detaljkonstruktion slutförd	Implementering slutförd	Förvaltning och förbättring	Förvaltning och förbättring

10 Teknikutveckling bränslehantering

Detta kapitel behandlar den teknikutveckling som planeras för hanteringen av det använda kärnbränslet i enlighet med de krav som slutförvaringen ställer. Frågor som har betydelse för den långsiktiga säkerheten och som rör bränslet efter förslutning av förvaret, till exempel bränsleupplösning, redovisas i kapitel 22.

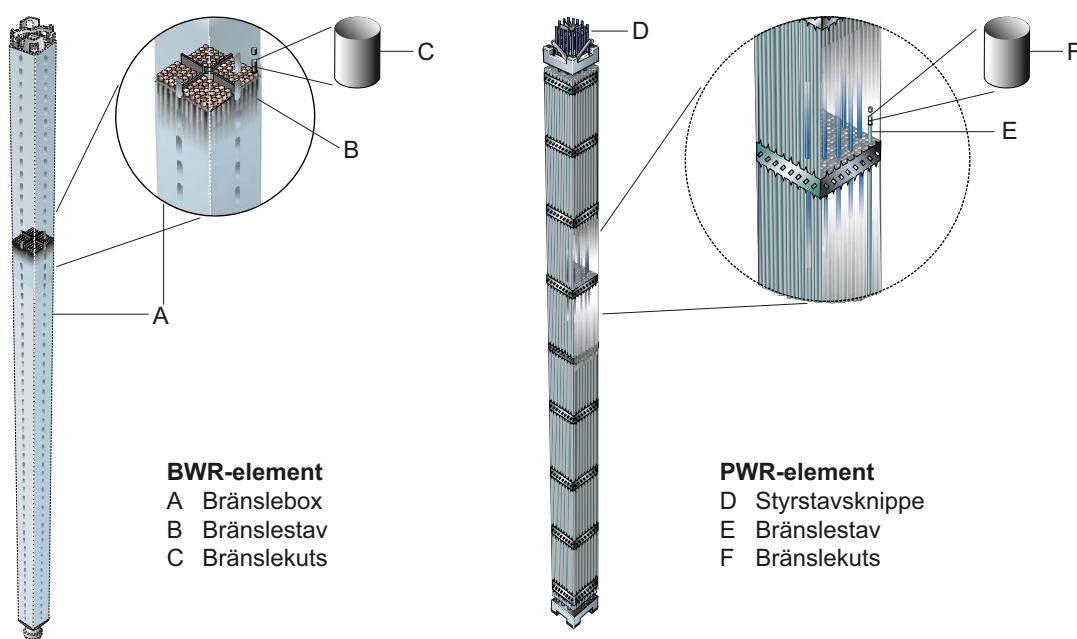
10.1 Krav och förutsättningar

Det använda kärnbränslet utgörs huvudsakligen av bränsleelement från de tolv svenska kärnreaktorerna. Figur 10-1 visar bränsleelement från en BWR-reaktor (BWR-element) och en PWR-reaktor (PWR-element). Utöver bränslet från de tolv reaktorerna ska en mindre mängd udda bränslen från den tidiga delen av det svenska kärnkraftsprogrammet, samt från forskning, slutförvaras.

Det använda kärnbränslets egenskaper påverkar utformningen av Kärnbränsleförvaret. Utformningen av förvaret resulterar i sin tur i krav på valet av bränsleelement för inkapsling samt på hanteringen av bränslet. Egenskaper hos bränslet som leder till krav på hanteringen är:

- anrikning,
- utbränning,
- avklingningstid (tid efter det att elementet tagits ur reaktorn).

Anrikningen och utbränningen påverkar bränslets reaktivitet och sannolikheten för kriticitet. Bränslets utbränning och avklingningstid styr tillsammans med mängden uran dess radionuklidinventarium och radioaktivitet. Radioaktiviteten är källan till strålning och värmeutveckling i bränslet. Bränslets reaktivitet, värmeutveckling och strålning ställer krav på hanteringen. Utöver de bränsleparametrar som ställer krav på hanteringen behöver vissa egenskaper hos bränslet vara kända med hänsyn till analyser som ingår i säkerhetsredovisningen. Det gäller exempelvis mängder och sammansättning på konstruktionsmaterial och bestrålningshistorik som har inverkan på radionuklidinventariet, se även avsnitt 22.1.2–22.1.4.



Figur 10-1. Bränsleelement från en BWR-reaktor (vänster) respektive PWR-reaktor (höger).

Samtliga bränsleparametrar som påverkar hanteringen av det använda kärnbränslet behöver också vara kända med hänsyn till kärnkraftsreaktorernas drift. Bränsleleverantörerna och reaktorägarna har därför utvecklat beräknings- och kontrollprogram för parametrarna. Programmen är kvalitetssäkrade och godkända för sitt ändamål av ansvariga myndigheter.

Förutom de nämnda bränsleparametrarna ställer mängden vatten och vattenånga som finns kvar i kapseln då den försluts krav på hanteringen. Eftersom vatten och vattenånga genom radiolys kan bilda salpetersyra och orsaka korrosion måste halterna i kapseln begränsas.

Krav relaterade till Kärnbränsleförvarets utformning och långsiktiga säkerhet

Resteffekt

Bränslets resteffekt beror på dess utbränning och avklingningstid. Resteffekten i ett bränsleelement beror också på mängden uran. Resteffekten påverkar temperaturen i slutförvaret. Gällande krav är att temperaturen i bufferten inte får överskrida 100 grader. Därför ska de bränsleelement som innesluts i en kapsel väljas med hänsyn till sin utbränning och avklingningstid så att den sammanlagda resteffekten i hela kapseln ligger under en högsta acceptabel nivå. Denna nivå påverkas bland annat av kapselns, buffertens och bergets värmeledningsförmåga och är enligt referensutformningen 1 700 W, se även avsnitt 22.2.3.

Strålning

Strålning på kapselns utsida kan leda till utvärdig korrosion av kopparkapseln. Analyser visar att korrosionsprocessen kan försummas om ytdosraten på kapseln inte överskrider 1 Gy/h /10-1/. Strålningen beror, liksom resteffekten, av bränslets utbränning och avklingningstid, se även avsnitt 22.1.2. Den strålning som når ut till kapselns utsida påverkas också av kapselns stråldämpande förmåga. För kombinationer av bränsleelement som kan accepteras för inkapsling med hänsyn till resteffektkravet ligger ytdosraten på ytan av en kapsel enligt referensutformningen med marginal under den acceptabla nivån. Vid hanteringen ska det verifieras att kapselns ytdosat inte överskrider den acceptabla nivån.

Vatten och vattenånga

För att undvika korrosion av insatsen i kapseln behöver mängden vatten och vattenånga i kapseln begränsas och huvuddelen av den luft som finns i kapseln ersättas med en inert gas. Därför ska atmosfären i kapseln ersättas med argon (> 90 procent) och bränsleelementen torkas så att mängden vatten i insatsen inte överskrider 600 gram, se avsnitt 11.1.3, 22.1.5 och 23.2.2.

Kriticitet

Kriticitet får under inga omständigheter uppstå i kapseln. Bränslets reaktivitet och sannolikheten för kriticitet beror på dess anrikning och utbränning samt på bränslegeometrin och de material som omger bränslet. För en given anrikning, geometri och omgivning avtar sannolikheten för kriticitet med utbränningen. För att förhindra kriticitet ska bränsleelement för inkapsling väljas med hänsyn till sin anrikning och utbränning samt kapselns geometri och material så att kriticitet inte kan uppstå under hantering eller efter deponering, även om kapseln är vattenfylld. Det krav som ställs är att den effektiva multiplikationskonstanten (k_{eff}) för det bränsle som placerats i kapseln, inklusive osäkerheter, ska ligga under 0,95, se även avsnitt 22.2.4.

Krav relaterade till driften av KBS-3-systemet

Inkapsling

Det är en fördel om kapslarna kan fyllas till sin maximala kapacitet. Därför ska bränsleelement för inkapsling väljas så att antalet kapslar blir så litet som möjligt och alla bränslepositioner i kapslarna är fyllda samtidigt som kraven relaterade till kriticitet och resteffekt beaktas. Vidare ska bränsleelement väljas så att antalet lyft och förflyttningar hålls lågt.

Driftsäkerhet och strålskydd

Med hänsyn till strålskydd och driftsäkerhet behöver aktivitetsinnehållet i kapseln och strålningen på dess yta vara kända. Både aktivitetsinnehåll och strålning begränsas av den maximalt tillåtna resteffekten. I samband med inkapsling ska det verifieras att aktivitetsinnehåll och strålning inte överskrider de nivåer som använts som förutsättningar i redovisningen av driftsäkerheten.

Kärnämneskontroll

SKB ska följa krav på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan. Efter inkapsling är det inte längre möjligt att kontrollera enskilda bränsleelement utan varje kapsel kommer att utgöra en enhet för kontroll av kärnämne. Det innebär att varje kapsel måste tilldelas en unik identitet.

10.2 Nuläge och program

SKI påpekade i granskningen av Fud-program 2007 att SKB bör redovisa hur man förvisar sig om att data för det använda kärnbränslet är korrekt innan det kapslas in. Om dokumentationen inte är komplett eller har brister bör SKB ta fram en åtgärdsplan för att hantera detta. Det bör även indikeras när SKB behöver veta att tillräcklig information finns om bränslet.

De bränsleparametrar som påverkar hanteringen av bränslet i anläggningarna och som behövs för analysen av drift- respektive långsiktig säkerhet har också betydelse för kärnkraftverkens säkra och effektiva drift. Parametrarna redovisas av kärnkraftverken inför transporten till Clab. SKB avser att beräkna radionuklidinventarium, strålning och resteffekt med samma, eller samma typ av program, som kärnkraftverken använder. Vid behov kan SKB genomföra verifierande mätningar i samband med leveransen till Clab. SKB utvecklar en speciell databas för dokumentation av bränslets egenskaper.

De avsnitt som följer redovisar SKB:s utvecklingsplaner inom de områden som omfattas av bränslelinjen. Radionuklidinventarium behandlas vidare i avsnitt 22.1.2 i del IV.

10.3 Resteffekt och strålning

Resteffekten ska beräknas för varje bränsleelement. Vid behov, till exempel om det finns osäkerheter i de uppgifter som kärnkraftverken redovisat, kompletteras beräkningarna med verifierande mätningar.

SKB har sedan mitten av 1990-talet följt utvecklingen av beräkningsprogram för resteffekt samt utvecklat metoder för att utföra kompletterande mätningar. Kalorimetriska mätningar har använts för att noggrant bestämma resteffekten. Dessa mätningar tar lång tid, och med hänsyn till att antalet bränsleelement är stort har även en snabbare metod, gammascanning, utvecklats. Vid gammascanning mäts gammastrålningen från klyvningsprodukten cesium-137. Strålningsintensiteten från cesium-137 uppvisar ett närmast linjärt samband med resteffekten. Metoden kan användas för bränsleelement med såväl kort som lång avklingningstid.

Metoderna för mätning av resteffekt har prövats på bränsleelement i Clab. Resultaten finns sammanställda i /10-2/ och visar på små skillnader mellan de båda mätmetoderna. Arbetet har delvis bedrivits tillsammans med Oak Ridge National Laboratory, som utvecklar beräkningsprogram. Resultaten har också använts för att validera och vidareutveckla beräkningsprogrammen. Eftersom resteffekt och strålning beror på samma parametrar kan samma beräkningsprogram och metoder användas för bestämning och verifiering av dessa.

Program

I syfte att få ett bättre statistiskt underlag och för att omfatta nya bränsletyper kommer mätningarna av resteffekt på enskilda bränsleelement i Clab att fortsätta ytterligare ett antal år. SKB:s mål är att en mätmetod för bestämning av resteffekt och andra relevanta bränsleparametrar ska vara utvecklad när uppförandet av inkapslingsanläggningen inleds.

10.4 Vatten och vattenånga

Under projekteringen av inkapslingsanläggningen har två metoder för torkning av bränsle utretts – vakuumtorkning respektive torkning med varmluft. Vakuumtorkning utgör referensmetod. Båda metoderna har bedömts uppfylla kraven avseende torkning av icke skadat bränsle. Beträffande skadat bränsle finns det osäkerheter om metodernas förmåga att driva ut vattnet genom så kallade ”pin holes” i bränslekapslingen är tillräcklig. Dessutom finns osäkerheter om förmågan att effektivt driva ut vatten ur PWR-bränslets styrtavar, se figur 10-1.

Program

SKB har startat ett projekt med syfte att utreda olika torktekniker. Projektet omfattar marknadsinventering, val av metod samt plan för verifiering och validering av torkmetoden, samt plan för kvalificering av utrustningen. SKB avser att fatta beslut om metod för torkning inför detaljprojektering av Clink.

10.5 Kriticitet

I kriticitets säkerhetsanalyserna för transport av använt kärnbränsle till Clab har den minskning i reaktiviteten som sker genom utbränning av bränslet när det bestrålas i reaktorn inte tillgodoräknats. För lagringen i Clab har utbränningen för anrikningar upp till 4,2 procent inte tillgodoräknats. För mellanlagring av PWR-bränsle med anrikning på 5 procent, och för det inkapslade använda kärnbränslet, måste dock utbränningskreditering tillämpas för att visa att kriticitetskraven uppfylls. Den metod som SKB har använt för utbränningskreditering följer en metod som utvecklats av Oak Ridge National Laboratory. Alla i dag kända bränsletyper i det svenska kärnkraftsprogrammet har analyserats tillsammans med information om kapseln enligt referensutformning /SKBdoc 1193244/.

Analys för referenskapseln och alla i dag kända bränsletyper visar att bränsle som använts normalt i kärnreaktorerna har en utbränning som innebär att det med marginal kan placeras i kapseln ur kriticitets säkerhetssynpunkt. Analyserna omfattar materialdefekter i kapselinsatsen. PWR-bränsle med hög anrikning och låg utbränning uppfyller dock inte kravet på kriticitets säkerhet. Vid tillräckligt låg utbränning gäller detta även om endast ett bränsleelement placeras i kapseln. Så låg utbränning kan endast förekomma i samband med stora bränsleskador eller oplanerade förtida slutliga avställningar av kärnkraftverk.

Program

SKB avser att komplettera genomförda kriticitetsanalyser genom att utreda vilken geometrisk konfiguration i kapseln som är mest reaktiv. Resultaten kan användas för att bedöma sannolikheten för kriticitet vid eventuella avvikelser i kapselns och bränslets geometrier.

SKB kommer även att utreda hur det PWR-bränsle som inte uppfyller kriticitetsvillkoren ska hanteras. Det finns ett antal olika sätt att mellanlagra och hantera sådant bränsle i Clab, samt att kapsla in det. Det alternativ SKB väljer kommer att presenteras i samband med ansökan om utbränningskreditering för Clab.

10.6 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll syftar till att myndigheter och kontrollorgan ska kunna förvissa sig om att kärnämne inte avleds. SKB:s anläggningar ska uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan. Det innebär att det ska finnas ett administrativt system för redovisning av kärnämne och var det finns placerat, samt tekniska system för kontroll och bevakning av att det inte avleds.

För inkapslat bränsle kommer systemet för kärnämneskontroll bland annat att innehålla uppgifter om de enskilda kapslarnas innehåll av kärnämne, vilka bränsleelement som kapslarna innehåller, när bränslet kapslades in, transporterades och anlände till Kärnbränsleförvaret, var kapslarna är

deponerade och det totala innehållet av kärnämne i förvaret. Enskilda kapslar och deras innehåll ska alltså kunna identifieras.

Kärnämneskontroll som uppfyller kraven kan genomföras med konventionell teknik och kräver ingen teknikutveckling. För nya kärntekniska anläggningar ska kontrollen av kärnämne beaktas redan i konstruktionsskedet så att tillsyn och kontroll underlättas. En viktig komponent i systemet för kontroll av kärnämne i Kärnbränsleförvaret är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med godkända ritningar. Detta görs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har angivits och att det inte förekommer utrymmen där man bedriver annan verksamhet än den som angivits.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2007 att SKB redovisar att visuell inspektion av bränsleelementen ska ske innan stållocket lyfts på kapseln, men utan att redovisa hur verifieringen ska göras eller dokumenteras. SKI såg detta som en kritisk punkt i hanteringen, eftersom SKB här övergår från att hantera enskilda bränsleelement till att kapseln blir den minsta enheten.

SKB menar att verifiering kan ske genom att använda flera kontrollanter och/eller genom fotografering. Kontrollprotokoll och fotografier kan lagras i enlighet med ställda krav. SKB har redogjort för den planerade kärnämneskontrollen inom KBS-3-systemet i samband med kompletteringen till ansökan om Clink som lämnades till SSM i oktober 2009. Det använda bränslets innehåll av kärnämne (klyvbart material) beror på anrikning och utbränning och kan beräknas med samma program som övriga bränsleparametrar som måste vara kända. Innehållet av kärnämne kan alltså bestämmas och verifieras samtidigt som resteffekten, se avsnitt 10.3.

11 Teknikutveckling kapsel

Kapselns ändamål och funktion är att innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radionuklider till omgivningen. Kapseln ska också dämpa strålning och förhindra kriticitet.

Detta kapitel behandlar den teknikutveckling som SKB bedriver för att tillverka, försluta, transportera och deponera den kapsel som ska användas. Kapitlet behandlar också de analyser som genomförs för att verifiera kapselns funktion och utreda vilka krav som ska ställas på tillverkning och kontroll av kapseln samt på system för transport och hantering av den förslutna kapseln.

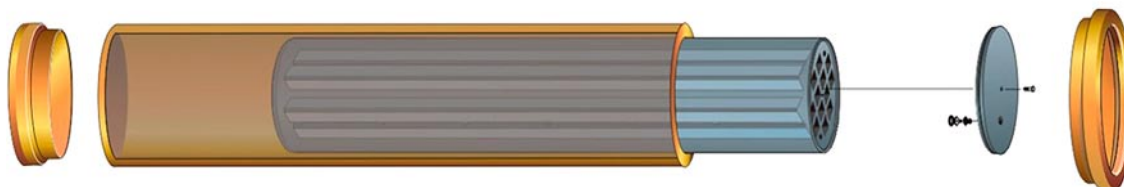
SKB:s referenskapsel är en cylindrisk behållare med ett tätt hölje av koppar och en lastbärande insats av segjärn i vilken använt kärnbränsle placeras, se figur 11-1. Insatsen finns i två varianter, en som rymmer tolv bränsleelement från BWR-reaktorer och en som rymmer fyra bränsleelement från PWR-reaktorer. SKB har också valt referensmetoder för tillverkning av kapselns komponenter samt för svetsning och förslutning. Kopparröret tillverkas med extrusion, kopparlock och -bottnar smids och insatsen gjuts. Svetsningen av kopparbotten och förslutningen görs med en utvecklad form av friktionssvetsning (friction stir welding, FSW).

Utvecklingen av kapseln har passerat konceptfasen och delar ligger redan nu långt inne i konstruktionsfasen. Avsnitt 11.2 ger en översikt av nuläge och program, följt av en sammanfattande tabell som även sammanfattar myndigheternas kommentarer på den redovisning som SKB gav i Fud-program 2007. Arbetet med detaljkonstruktionen för kapseln beskrivs sedan i avsnitt 11.3, tillverkning av kapselkomponenter i avsnitten 11.4–11.5 och svetsning i avsnitt 11.6. Vidare beskrivs utvecklingen inför nukleärisering av provnings- och kontrollmetoder vid förslutning och hantering i Clink i avsnitt 11.6, och utvecklingen av hur kapseln ska hanteras och deponeras i Kärnbränsleförvaret i avsnitt 11.7.

11.1 Krav och förutsättningar

SKB angav i Fud-program 2007 att de konstruktionsförutsättningar som presenterades inte var fullständiga och i sin granskning konstaterade myndigheten att ”SKB behöver fortsätta att utveckla konstruktionsförutsättningarna så att de kan ge ett bättre underlag för materialval, dimensionering och tillverkningskontroll av kapseln”.

SKB har fortsatt arbetet med att precisera konstruktionsförutsättningar för kapseln. Ett viktigt underlag för detta är den sammanställning av dimensionerande belastningar samt detaljerade specifikationer av vad kapseln ska uppfylla i Kärnbränsleförvaret som SKB tagit fram som resultat av arbetet med senaste analysen av förvarets långsiktiga säkerhet SR-Can /11-1/ och den analys av kapselns hållfasthet och skadetålighet (designanalys) som SKB nu har genomfört /11-2/. Förutom genomgången av belastningar i förvaret har en genomgång gjorts av de belastningar kapseln utsätts för i anläggningarna och under transport, vilket inneburit att kapseln också har kontrollberäknats för lyft i locket.



Figur 11-1. Sprängskiss som visar referenskapselns komponenter. Från vänster kopparbotten, kopparrör, insats och kopparlock.

Konstruktionsförutsättningarna för kapseln relaterar till:

- barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret,
- det använda kärnbränslet som ska kapslas in,
- produktionen av kapslar och inkapsling,
- driften av KBS-3-systemet.

Förutsatt att driften av anläggningarna och transportsystemet sker normalt ska kapslarna kunna deponeras på ett säkert sätt utan att de egenskaper som är viktiga för barriärfunktionen i Kärnbränsleförvaret har påverkats. Detta medför att acceptanskriterier kommer att behövas för driften, till exempel för högsta tillåtna temperatur på kapselytan, intryckningar eller repor på kopparhöljet och förekomst av kemikalier. Arbetet med att specificera dessa kriterier pågår.

11.1.1 Barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret

I Kärnbränsleförvaret ska kapseln innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktiva substanser. Detta innebär att:

- Kapselns hölje ska motstå den korrosion det utsätts för i Kärnbränsleförvaret. Kopparn i höljet ska därför ha en nominell tjocklek på fem centimeter och den ska vara av hög kvalitet för att undvika korngränskorrosion. Syrehalter på några tiotals ppm kan tillåtas.
- Kapseln ska motstå en isostatisk last på 45 MPa, vilket motsvarar summan av det maximala svälltrycket som förväntas i bufferten och det maximala grundvattentrycket på förvarsdjup. Detta medför att egenskaper som har betydelse för insatsens hållfasthet är viktiga liksom kopparhöljets krypduktilitet.
- Kapselns hölje ska vara tätt och insatsens tryckbärande förmåga intakt efter en skjuvrörelse hos berget på fem centimeter med hastigheten upp till en meter per sekund. Detta medför att insatsens brottmekaniska egenskaper och dimensioner är viktiga liksom kopparhöljets brottförlängning och brottseghet.
- Kapseln ska också förhindra kriticitet vilket medför att insatsen ska utformas så att kriticitet inte kan uppstå även om vatten trängt in i en defekt kapsel. Verifieringen av säkerheten mot kriticitet utgår från en materialsammansättning i segjärnet med halterna Fe > 90 procent, C < 4,5 procent och Si < 6 procent samt en bränslekonfiguration som bestäms av referenskapslarnas geometri.
- Kapseln ska bidra till att strålningen på ytan blir mindre än 1 Gy/h.

11.1.2 Det använda kärnbränslet

Kapseln ska rymma de olika typer av använt kärnbränsle som ingår i det svenska kärnbränsleprogrammet. För kontrollen av kärnämne ska varje kapsel ha en unik märkning som kan avläsas när kapseln placerats i deponeringshålet.

11.1.3 Produktion av kapslar och inkapsling

Kapslar ska kunna tillverkas och förslutas med hög tillförlitlighet. De ska också kunna inspekteras för att säkerställa att de uppfyller fastställda kriterier.

Vid inkapsling ska följande beaktas:

- Bränsleelement ska väljas så att kriticitet i kapseln förhindras.
- Atmosfären i insatsen ska ersättas med > 90 procent argon och bränsleelementen torkas så att mängden vatten i insatsen inte överskrider 600 gram. Detta för att begränsa mängden salpetersyra som kan bildas i kapseln och påverka insatsens långsiktiga funktion.
- Strålningsnivån på utsidan av kapseln ska vara mindre än 1 Gy/h. Om denna strålningsnivå inte överskrider blir korrosionen av kopparhöljet på grund av bildad salpetersyra utanför kapsel försumbar.

Nuläge och program som berör dessa tre punkter presenteras i kapitel 10.

11.1.4 Driften av KBS-3-systemet

Kapseln ska kunna transporteras, hanteras och deponeras på ett säkert sätt utan att de egenskaper som har betydelse för dess barriärfunktioner i Kärnbränsleförvaret påverkas signifikant.

Kapselmaterialens egenskaper har undersökts vid olika temperaturer och speciellt för koppar har krypegenskaperna undersökts upp till 175 °C, utan tecken på materialdegradering. Såväl koppar som segjärn bibehåller viktiga egenskaper som brott- och sträckgräns väl vid uppvärmning upp till 125 °C. Vid hantering ska därför kapselns yttertemperatur begränsas till 100 °C vilket ger god marginal för att undvika materialpåverkan.

11.2 Nuläge och program

Barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret

SKB har gjort deterministiska analyser av insatsens hållfasthet och därmed verifierat att insatsen för BWR-bränsle uppfyller hållfasthetskraven. Analyserna har genomförts givet de materialegenskaper som kunnat uppnås vid tillverkning under produktionsliknande förhållanden. Analyser av skadetålighet visar att insatsen har hög skadetålighet vid isostatisk belastning. En uppdaterad probabilistisk analys av en isostatisk last på 45 MPa visar en försumbar risk för att en kapsel med BWR-insats ska kollapsa. Skadetåligheten är betydligt lägre vid skjuvbelastning och beräkningarna visar att ganska små ytdefekter kan initiera sprickbildning. Preliminära analyser av PWR-insatsen visar att även den uppfyller hållfasthetskraven men representativa materialdata från serietillverkning behövs för att slutföra analyserna.

Analysen av PWR-kapselns hållfasthet och skadetålighet kommer att kompletteras med deterministiska analyser för de olika belastningsfallen samt en probabilistisk analys för isostatlasten 45 MPa. Dessutom planeras probabilistiska analyser av skjuvlastfallet för båda varianterna av kapseln.

Att kopparhöljets integritet upprätthålls under belastningarna i förvaret har visats genom kryptmodellering. Genomförda prov av kalldeformerat material visar att kopparmaterialets krypduktilitet minskar med ökande kalldeformation. Modellering och prov visar att hanteringskador kan ge upphov till förhållandevis omfattande kalldeformation.

Ett område där fortsatt arbete planeras är de tekniska specifikationerna för insatsen. De omfattande hållfasthetsanalyserna ger underlag för en värdering av de uppställda specifikationerna, som endera ska verifieras eller om skäl finns förändras eller kompletteras.

Produktionen av kapslar och inkapsling

Ett utvecklingsprogram för tillverkning av BWR-insatser har genomförts. Att programmets mål uppnåtts verifierades genom att en demonstrationsserie om fem insatser tillverkades under produktionsliknande förhållanden och utvärderades. Materialdata från denna utvärdering har använts vid den beräkningsmässiga verifieringen av BWR-insatsens hållfasthet. Vidareutvecklingen av tillverkningsstekniken för PWR-insatser är prioriterad och sker parallellt vid två gjuterier.

Tillverkningsprocessen för kopparrör har vidareutvecklats och den geometriska noggrannheten för extruderade rör har förbättrats. Det återstår att minska variationen med avseende på kornstorlek. Strukturvariationen utgör inte någon begränsning från hållfasthets- och långsiktig integritetssynpunkt, men kan påverka tillförlitligheten för kvalitetskontroller med ultraljudsprovning. För att komma tillrätta med detta pågår både simulering av extrusionsprocessen och extrusionsförsök i laboratorieskala. Resultaten från dessa ger vägledning om vilka förändringar som kan införas i tillverkningsprocessen för att minska problemet.

SKB har visat att svetsgodset har nära nog likvärdiga kemiska och mekaniska egenskaper som grundmaterialet. För att minska eller eliminera de defekter som ibland förekommer i svetsgodset i form av oxidinneslutningar eller så kallad foglinjeböjning har SKB vidareutvecklat såväl processstyrningen, svetsystemet som svetsverktyget. Förekomsten av oxid kan elimineras genom svetsning i skyddsgas och svetsprov har utförts med gott resultat.

Utvecklingsarbetet för svetsprocessen involverar flera kompetenser; Center for Friction Stir Processing i USA arbetar med verktygsutveckling, Lunds Tekniska universitet med processtyrning och ESAB med utvecklingen av svetsssystemet. Utvecklingen av svetsning styrs av SKB och resultat implementeras i Kapsellaboratoriets svetsssystem där också utvärderingen av teknikutvecklingen görs.

Arbetet med att ta fram acceptanskriterier för kapslarna pågår. För insatserna baseras dessa kriterier till stor del på genomförda skadetålighetsanalyser. Vissa frågor behöver bearbetas vidare för att SKB ska kunna fastställa den detaljerade kravbilden avseende defekter och därmed fastlägga de underliggande kraven på oförstörande provning (OFP). För kopparhöljet är läget annorlunda eftersom de dimensionerande kraven är kopplade till materialets krypduktilitet och tjockleken på den intakta kopparbarriären. Produktionsmässigt har de gränser som finns angivna i de tekniska specifikationerna avseende kopparmaterialet kunnat uppnås.

Vid Kapsellaboratoriet fortsätter utvecklingen av teknik för OFP. Målet är att ta fram och prova ut tekniken för provning av kapselns komponenter och svetsar för att kunna säkerställa att acceptanskriterierna avseende defekter uppfylls.

SKB använder provning med ultraljud som anpassas så att defekter som bedöms kunna uppstå ska kunna detekteras. Detta innebär att provningen anpassas med avseende på det spann av storlek, position och orientering som defekterna kan tänkas ha. Endast några få defekter har kunnat påvisas i de tillverkade kopparkomponenterna. För FSW-svetsarna finns bättre underlag för möjliga materialdefekter eftersom svetsprocessen har kunnat drivas utanför det avsedda processfönstret varvid olika typer av defekter har kunnat åstadkommas.

Att SKB regelmässigt provar kapselkomponenter och svetsar med OFP bidrar till att effektivisera processutvecklingen men också till att värdefull erfarenhet fås av provningssystem, utformning av provningsmetoder, provningsprocedurer samt metoder för tolkning och utvärdering av provningsresultat. Nyttan av återkopplingen mellan provning och tillverkning kan åskådliggöras med gjuteritekniken för insatser. Genom att utveckla en metod för ultraljudsmätning av de yttre kanalrörens position i BWR-insatsen har rörens position kunnat bestämmas utefter hela insatsens längd. Provningsresultat visade att rören i vissa fall var böjda, ett fenomen som kunde knytas till ett visst förfarande vid gjutningen. Genom att modifiera gjuteriprocessen kunde en viktig parameter för insatsernas hållfasthet säkerställas.

För segjärnsinsatserna har provningen av de yttre delarna prioriterats, eftersom de har stor betydelse för hållfastheten, medan provmetoder för att kontrollera homogeniteten hos insatsens inre delar kommer att utvecklas senare.

Hantering och deponering av kapslar

SKB har genomfört en förstudie av lösningar för transporter av kapslar från Kärnbränsleförvarets driftområde ovan mark till försvarsnivån. Förstudien visar att ett koncept där en transportbehållare (KTB) med kapsel transporteras på en separat lastbärande ram ger en rationell hantering och underlättar bärgning vid ett eventuellt haveri i rampen.

En ny deponeringsmaskin har tagits fram i prototyputförande. Maskinen har testats i manuell drift vid Äspölaboratoriet. Parallellt med dessa tester har maskinen försetts med ett avancerat navigations- och positioneringssystem.

Sammanfattning av nuläge och program

Tabell 11-1 sammanfattar myndigheternas kommentarer på den redovisning av utvecklingsprogrammet för kapseln som SKB gav i Fud-program 2007, samt nu aktuellt läge och program för utvecklingsarbetet.

Tabell 11-1. Sammanfattning av myndigheternas kommentarer på redovisningen av teknikutveckling för kapseln i Fud-program 2007, SKB:s nuläge, samt SKB:s program.

Myndigheternas kommentarer på Fud-program 2007	SKB:s nuläge	SKB:s program
Kapselutformning – analys av kapseln		
Saknar fullständig designanalys.	Genomfört designanalys för kopparhöljet. Genomfört hållfasthets- och skadetålighetsanalys för BWR-insatser och preliminära analyser för PWR-insatser. Genomfört probabilistisk analys av isostatlastfallet för BWR.	Analysera effekter av lokala ytdeformationer. Genomföra slutlig hållfasthets- och skadetålighetsanalys för PWR-insatser med relevanta materialdata. Genomföra probabilistisk analys av isostatlastfallet för PWR, samt av skjuvlastfallet för både BWR och PWR.
Saknas krav på material och geometriska toleranser och defekter av betydelse för tillverkning.	Identifierat krav för kanalrörens position. Undersökt kallbearbetningseffekter som kan uppkomma vid tillverkning och hanteringskador.	Revidera specifikationer för insatserna utgående från den genomförda och kompletterade (enligt ovan) designanalysen. Fastställa acceptanskriterier för kallbearbetning och andra defekter vid tillverkning och hantering.
Tillverkning av insatser		
SKB har tillverkningsmetoder som behöver vidareutvecklas.	Vidareutvecklat tillverkningsprocessen för BWR-insatser och verifierat denna med en demonstrationsserie. Genomfört faktorförsök för olika parametrar vid gjutning av PWR-insatser och utvecklat metoden vid två gjuterier.	Optimera processen och verifiera att den uppfyller kraven med en demonstrationsserie för PWR-insatser vid ett gjuteri.
Oförstörande provning (OFP) av insatser		
Utveckling och kvalificering av flera kompletterande provningsmetoder är viktig.	Utvecklat ultraljudsteknik för provning av insatsens mest belastade yttre del (< 200 millimeter) samt kontroll av kanalrörens avstånd till insatsens yta. Framtagen ultraljudsteknik har använts vid provning av cirka 20 insatser. Tillförlitligheten har studerats.	Vidareutveckla teknik för OFP av insatsens ytterområden med ultraljudsteknik samt kompletterande teknik för att påvisa ytdefekter. Utveckla teknik för OFP med ultraljud av insatsens inre del. Ta fram acceptanskriterier för provning.
Tillverkning av kopparkomponenter		
SKB har tillverkningsmetoder som behöver vidareutvecklas.	Förbättrat formriktigheten hos extruderade rör genom modifiering av processsystemet. Orsaker till strukturojämnheter i extruderade kopparrör har analyserats genom simulering och laboratorieförsök. Kallbearbetningseffekter vid smidning av kopparlock har undersökts. Metod för avspänningsglödning har utprovats. Utvecklat smidningstekniken för minskad kornstorleksvariation. Förbättrat smidesprocessen och tagit fram processparametrar baserade på faktorförsök för smidning av kopparlock. Vidareutvecklat tillverkningen av rör med dornpressning och smidning.	Genomföra en demonstrationsserie för verifiering av uppnådda resultat. Avsluta laboratoriestudier och implementera resultaten i tillverkningsprocessen. Verifiera att processen uppfyller kraven genom demonstrationsserien. Implementera avspänningsglödning i tillverkningsprocessen för lock/bottnar. Demonstrera utvecklad smidningsteknik och metod för avspänningsglödning av lock och bottnar. Genomföra och utvärdera en demonstrationsserie för att verifiera teknikutvecklingen av smide av lock och bottnar. Vidareutveckla tillverkningen av rör med dornpressning och smidning.
Oförstörande provning (OFP) av kopparkomponenter		
	Implementerat preliminära provningsmetoder för ultraljud. Utvärderat detektionsförmåga och tillförlitlighet.	Vidareutveckla teknik för ultraljudsprovning. Studera och karakterisera möjliga defekttypen, ta fram krav för detekterings- och storleksbestämning av dessa. Utveckla teknik för ytkontroll.
Förlutningssvetsning		
SKB måste visa att defekter så som oxidpartiklar kan elimineras och foglinjeböjning kan bemästras.	Förbättrat exakthet vid inspänning av kapseln och processtyrningen så att foglinjeböjningen kan kontrolleras. Optimerat svetsverktygets utformning.	Optimera styrsystemet och automatisera provningen. Verifiera att processen uppfyller operativa krav samt att svetsgodset uppfyller krav på egenskaper.

Myndigheternas kommentarer på Fud-program 2007	SKB:s nuläge	SKB:s program
	Demonstrerat genom provsvetsning att svetsprocessen och svetsystemet är robusta och stabila. Startat utprovning av svetsning i skyddsgas.	Ta fram underlag för system i inkapslingsanläggning. Färdigställa process för svetsning i skyddsgas för att minimera oxidbildning.
	Mikrostrukturella undersökningar av svetsgodset pågår.	Göra verifierande mikrostrukturella undersökningar av svetsgodset bland annat med avseende på oxider och foglinjeböjning.
Oförstörande provning (OFP) förslutningssvetsar	Implementerat ultraljudsprovning för kontroll av svetsar (provat cirka 70 svetsar). Utvärderat detektionsförmåga och tillförlitlighet vid provningen.	Ta fram detaljerade acceptanskriterier för defekter samt vid behov vidareutveckla ultraljudsprovningen. Utveckla teknik för ytkontroll av svetsarna.
Hantering och deponering av kapslar	En redovisning av hur lastning, lossning och deponering av kapseln ska ske efterfrågas.	Genomfört förstudie av transportlösningar. Utvecklat deponeringsmaskin med navigations- och positioneringssystem. Göra fullskaliga tester med deponeringsmaskinen vid Äspölaboratoriet. Förtydliga kraven på rampfordon och förbereda underlag för upphandling.

11.3 Kapselutformning – analyser av kapseln

SKI framhöll i sin granskning av Fud-program 2007 att det "...saknas en fullständig designanalys av kapseln innehållande en dimensionering av kapseln och en sammanställning av de hållfasthetsanalyser som genomförts med referens till aktuella konstruktionsförutsättningar. En sådan sammanhållen designanalys av kapseln inklusive säkerhetsmarginaler bör SKB ta fram inför ansökan om att få bygga slutförvaret". Vidare påpekade myndigheten att det "saknas vissa återstående krav på kapselns olika material liksom vissa slutliga geometriska toleranser som har betydelse för tillverkningen av kapseln. Det saknas också uppgifter om de största tillåtna defekterna i kapselns olika delar som har betydelse för tillverkningskontrollen".

SKB har genomfört hållfasthetsanalyser och skadetålighetsanalyser (designanalys) för kapseln för att verifiera att referenskapseln uppfyller krav och konstruktionsförutsättningar /11-2/.

Hållfasthetsanalysen av BWR-insatsen med stållock visar att den har stora marginaler vid en isostatisk last på 45 MPa. För detta lastfall kan förhållandevis stora defekter tillåtas i materialet i insatsens cylindriska del och en viss geometrisk förskjutning av insatsens stål-kasset kan tolereras. De plastiska deformationerna och krypdeformationerna i kopparhöljet blir generellt små (mindre än 1 procent). Beräkningarna visar att i änden av foglinjen mellan lock och cylinder kan stora lokala töjningar uppstå (upp till 30 procent). Den globala töjningen i området är betydligt lägre (12 procent) vilket förhindrar ett propagerande förlopp.

I designanalysen framgår att skjuvlast i kombination med glaciation, om detta inträffar, inte skulle vara allvarligare för kapselns insats än att enbart skjuvning inträffar. Analyserna visar att referenskapseln kan motstå en skjuvrörelse på 5 centimeter. Insatsen är den kapselkomponent som i detta fall är känsligast för ytdefekter. För det "minst gynnsamma" fallet med avseende på buffertens densitet, angreppsvinkel och angreppspunkt kan semielliptiska ytsprickor (förhållande längd:djup, 6:1) med ett djup av drygt 4 millimeter tillåtas. En skjuvrörelse på 5 centimeter vinkelrätt mot kapseln resulterar i en maximal plastisk töjning i ett litet lokalt område av kopparhöljet på strax över 20 procent. Det är samma storleksordning som vid långsam krypning i slutförvaret. Ytterligare krypning efter en skjuvning förväntas endast ge små tillskott (storleksordning ett par procent) till den totala deformationen. Denna krypning relaxerar de spänningar som uppstått i kopparhöljet vid skjuvningen.

Program

Verifieringen av att referenskapseln uppfyller de krav som ställs kommer att fortsätta, med fortsatta analyser av kapseln i BWR- och PWR-utförande. Resultaten från dessa analyser kommer att ligga till grund för uppdatering och komplettering av bland annat acceptanskriterier för oförstörande provning av insatser.

De deterministiska och probabilistiska analyser som gjorts för att demonstrera hållfastheten hos BWR-insatsen vid isostatlast kommer att kompletteras med motsvarande analyser för PWR-insatsen så snart representativa materialdata finns att tillgå från den demonstrationsserie som SKB planerar att genomföra för PWR-insatser.

Den deterministiska analysen som gjorts för BWR-insatser inkluderar skadetålighet vid en skjuvrörelse i berget, och kommer att kompletteras med en probabilistisk analys. Motsvarande deterministiska och probabilistiska analyser kommer att genomföras för PWR-insatser. De omfattande hållfasthetsanalyserna ger underlag för en värdering av de uppställda tillverknings-specifikationerna som endera ska verifieras eller om skäl finns förändras eller kompletteras.

Analyserna av kopparhöljets krypegenskaper kommer att fortgå som underlag för pågående vidareutveckling av krypmodellen (se även avsnitt 23.2.3). Detta arbete omfattar fortsatta studier av påverkan av kallbearbetning på koppars krypegenskaper samt att implementera detta i krypanalyserna. Kallbearbetningseffekter inkluderar inverkan av lokala skador som kan uppstå vid hantering av kapselkomponenter eller färdig kapsel.

11.4 Tillverkning och provning av insatser

11.4.1 Tillverkning

Insatsen är kapselns lastbärande komponent och tillverkas av segjärn. Insatsen innehåller en stål-kassett som ger de kanaler där bränsleelementen placeras och är försedd med ett stållock. Insatserna gjuts och därefter maskinbearbetas de till slutliga dimensioner.

SKB har under lång tid utvecklat tillverkningen av insatser i samarbete med leverantörer. SKI konstaterade i sin granskning av Fud-program 2007 att det finns metoder för att tillverka kapselkomponenter och hela kapslar, men ansåg att metoderna behöver vidareutvecklas. Vidare påpekade myndigheten att när det gäller serieproduktion finns behov av ytterligare arbetsinsatser.

Under perioden 2007–2009 har 24 segjärnsinsatser tillverkats, varav 13 är PWR-insatser och 11 BWR-insatser /SKBdoc 1175208/. Ett utvecklingsprogram för tillverkning av BWR-insatser har genomförts. Programmet avslutades med att fem insatser göts under produktionsliknande förhållanden i en så kallad demonstrationsserie. Tillförlitligheten vid tillverkningen av BWR-insatser analyserades genom att materialegenskaperna i provskivor från botten, mitten och toppen av insatserna undersöktes. Alla insatser uppfyllde tillverkningskraven.

Vid utvärderingen av demonstrationsserien kunde SKB konstatera att betydande framsteg gjorts i tillverkningstekniken. Variationsbredden i processen har minskat betydligt. Speciellt tillfredställande är att materialduktiliteten är betydligt jämnare än tidigare, vilket brottseghetsprovning visat. Baserat på data från demonstrationsserien har en probabilistisk analys gjorts som visar att sannolikheten för lokal plasticering av insatsen vid maximal isostatlast är försumbar /11-2/.

Utvecklingen av tekniken för gjutning av BWR-insatser anses färdig givet den kravbild som legat till grund för utvecklingsarbetet. Ytterligare arbete kan komma att behövas för att möta eventuell tillkommande krav vid den planerade revisionen av de tekniska tillverknings-specifikationerna för insatsen. Som ett led i samarbetet med Posiva deltar SKB också i utvecklingen av BWR-insatser vid ett finskt gjuteri.

Lärdomarna från utvecklingen av BWR-insatserna har varit en utgångspunkt för motsvarande utveckling för PWR-insatser. De ur tillverknings-synpunkt avgörande skillnaderna mellan BWR- och PWR-insatser är att både mängden gjutgods och kanalrörens dimensioner är större i PWR-insatser.

Detta har medfört nya frågor rörande variationer i materialstrukturen och deformationer av kanälröen. Det senare har kunnat hanteras genom förbättrad teknik för packningen av den gjutsand som ger stadga åt kanälröen under gjutning. Fortsatt optimering av denna packningsteknik planeras. Framsteg har också gjorts med att hålla variationerna i materialstruktur inom acceptabla gränser.

En systematisk metod har använts för att undersöka de viktigaste processparametrarna vid gjutning. Under 2008 och 2009 har två omgångar faktorförsök, med fyra tillverkade PWR-insatser och tre varierade processparametrar i vardera försöksomgång, genomförts hos ett av de två gjuterier dit utvecklingsarbetet koncentrerats. Utvärderingen av det andra faktorförsöket pågår. Kunskapsläget sommaren 2010 är att minst en av de båda utvecklade gjuteriprocesserna bedöms ge godkänt resultat avseende materialegenskaper och formriktighet.

Som nämnts pågår ett arbete för att sammanställa vilka egenskaper som är viktiga för kapselns mekaniska integritet baserat på den genomförda designanalysen. Detta arbete kommer att ligga till grund för den slutliga utvärderingen av gjutprocesserna. När teknikutvecklingen för PWR-insatser har nått uppställda mål kommer en demonstrationsserie att genomföras vid ett av gjuterierna. Vid utvärderingen av denna serietillverkning undersöks variationsbredden i processen. Statistiska mått för de viktiga parametrarna hos insatserna används i probabilistiska analyser för insatsen.

Viss förekomst av materialdefekter anses vara oundvikligt i så stora gjutgods som insatserna är. Den oförstörande provning med ultraljud som regelmässigt görs på tillverkade insatser ger successivt kunskap om förekomsten av defekter. Defekter som upptäcks analyseras i vissa fall med röntgen och metallografiska undersökningar. Informationen används både i utvecklingen av tillverkningsprocessen och för att optimera ultraljudsprovningen.

Figur 11-2 visar ett ställock till en insats. Locken kommer att levereras till kapselfabriken kompletta med färdiga mått och hål för ventil för atmosfärsbyte samt en centrumskruv för montering i insatsen. Materialvalet är i dagsläget en stälkvalitet S355J2, som använts i en hållfasthetsanalys. Analysen visade att valda dimensioner och stälkvalitet klarar designlasten 45 MPa.



Figur 11-2. En del av en maskinbearbetad insats och ett ställock med hål för ventil för atmosfärsbyte samt en centrumskruv för montering i insatsen.

Program

Det fortsatta utvecklingsarbetet omfattar att:

- utvärdera de båda gjutprocesserna för PWR samt genomföra en demonstrationsserie vid ett gjuteri,
- undersöka variationsbredden för viktiga parametrar hos insatsen,
- kartlägga olika former av defekter i insatserna,
- optimera packningstekniken för att säkerställa formriktigheten hos kanalrören,
- revidera de tekniska specifikationerna för insatsen,
- genomföra monteringsprov för stållocket.

11.4.2 Provning av insatser

Myndigheten påpekade i sin granskning av Fud-program 2007 att utveckling och kvalificering av provningsmetoder är lika viktigt för segjärnsinsatsen som för hölje och förslutningssvets, samt att den oförstörande provning som behövs ska baseras på konstruktionsförutsättningar och hållfasthetsanalyser enligt den praxis som används inom kärnkraftverken. SKI ansåg vidare att det är nödvändigt och viktigt att SKB utvecklar flera olika provningsmetoder som kompletterar varandra.

SKB avser att utveckla provningsmetoder som ska säkerställa att de krav som ställs i den designanalys som presenteras i avsnitt 11.3 uppfylls. För vissa detaljer såsom stållock och bultar kommer alternativet att köpa standardprodukter med tillhörande kvalitetscertifikat att undersökas, vilket SKI i sin granskning av Fud-program 2007 ansåg borde vara möjligt så länge krav på underleverantören utreds och redovisas.

Under de senaste åren har fokus legat på att implementera de preliminära provningsmetoder för kvalitetskontroll av de segjärnsinsatser som ingår i programmet för provtillverkning som redovisades i Fud-program 2007, samt att utvärdera metodernas tillförlitlighet. Arbetet inom oförstörande provning är sammanställt i /SKBdoc 1179633/ och sammanfattas nedan.

Som ett led i implementeringen av provningsmetoderna har instruktioner för kvalitetssäkring av ultraljudsprovning tagits fram. Dessa baseras på två olika typer av teknik. Den ena är TRL-teknik (Transmitter-Receiver-Longitudinal), där en sändare genererar longitudinella vågor med 70 graders vinkel som tas emot av en mottagare. Denna teknik är lämplig för att undersöka material med grov struktur och används för avsökning av det yttre området av insatsen. Den andra typen, så kallad ”phased array”-teknik där ljudet sänds in vinkelrätt mot ytan, används i områden ned till cirka 200 millimeter från insatsens mantelyta. Provning med phased array medger elektronisk fokusering för ökad förmåga att detektera defekter på större djup. Ett tjugotal insatser, både BWR och PWR, har provats med dessa tekniker, varvid endast enstaka diskreta defekter har indikerats. TRL-tekniken har gett vissa indikationer som vid utvärdering visat sig vara variationer i porositet. Phased array-provningen har även kunnat användas för att mäta avståndet mellan mantelytan och de yttre hörnen hos kanalrören. Detta avstånd är en viktig parameter för insatsens hållfasthet.

Förberedande studier har gjorts av hur de centrala delarna av insatsen ska provas. En möjlighet är att använda så kallad transmissionsprovning, där ljud skickas från en sändare på ena sidan av insatsen till en diametralt positionerad mottagare. Preliminära prov visar att detta är genomförbart men också att det ställs stora krav på att den utrustning (fixtur) som fixerar och positionerar givarna är stabil. Utvecklingen inom detta område sker i samarbete med Posiva.

De preliminära provmetodernas tillförlitlighet har studerats i samarbete med BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) i Berlin. TRL-tekniken har studerats med avseende på gnistade spår (för simulering av sprickliknande defekter). Resultatet visar på en detekteringsförmåga ($a_{90/95}$) på 2–3 millimeter för ytnära defekter och 4–9 millimeter för defekter på 50 millimeters djup. Phased array-tekniken har studerats på sidoborrade hål med resultat som visar en detekteringsförmåga ($a_{90/95}$), som minskar med ökat avstånd från mantelytan, på 2–8 millimeter. Dessa försök syftar främst till att studera provningens känslighet i olika områden och kommer att kompletteras med studier på verkliga defekter för att provningens tillförlitlighet ska kunna beskrivas.

Program

Resultaten från en nyligen genomförd designanalys ligger till grund för planerna att ta fram acceptanskriterier för den oförstörande provningen. Som ett led i detta kommer kompletterande deterministiska beräkningar att göras.

Som en följd av att skjuvlastfallet enligt designanalysen ställer stora krav på detektering av relativt små defekter i ytterområdet av insatsen kommer vidareutvecklingen av OFP att omfatta teknik för provning av ytliga och ytnära defekter. Flera tekniker kommer att utvärderas såsom induktiv provning, magnetpulverprovning samt olika varianter av ultraljudsprovning, exempelvis TOFD (Time of Flight Diffraction).

SKB avser dessutom att optimera provningsmetoderna samt utveckla och implementera teknik för provning av området mellan kanalrören i både BWR- och PWR-insatserna, samt bestämma metodernas detekteringsförmåga för verkliga defekter. Modellering kommer att göras som stöd för den experimentella utvecklingen.

11.5 Tillverkning och provning av kopparkomponenter

11.5.1 Tillverkning av kopparkomponenter

SKI angav i sin granskning att det finns metoder för att tillverka kapselkomponenter som dock behöver vidareutvecklas, samt att utvecklingsbehov finns även i de fall då SKB har valt en referensmetod. SKI menade att SKB:s redovisade utvecklingsprogram är ändamålsenligt och går i rätt riktning.

Under perioden 2007–2009 har SKB tillverkat sju stora koppargöt för rörtillverkning och 14 mindre koppargöt för tillverkning av lock och bottenar. Under samma period har sju kopparrör tillverkats genom extrusion, åtta rör med dornpressning och tre rör har smitts.

Den geometriska noggrannheten har förbättrats för extruderade rör. Tendensen med krökta rör från extrusionsprocessen har eliminerats genom förbättringar av processsystemet, ett så kallat styrrör har tillverkats och använts för att förbättra raketten hos kopparröret. Efter införandet av styrröret har samtliga extruderade rör uppfyllt tillverkningskravet på raketten.

Områden med förhöjd ljuddämpning, så kallade stråk, har påvisats vid ultraljudsprovning av extruderade rör. Detaljerade studier av stråken visar att de har avvikande kornstorlek jämfört med resterande delar av rören. Medelkornstorleken i stråken är 170–250 μm , att jämföra med 70–150 μm i övriga delar. Stråken har normala mekaniska egenskaper och de uppfyller tillverkningskravet för kornstorlek, som är $\leq 360 \mu\text{m}$. Effekten av stråken är försämrade provbarhet, eftersom ultraljud är känsligt för variationer i kornstorleken i koppar. För att hantera detta problem simuleras extrusionsprocessen och extrusionsförsök görs i laboratorieskala. Parallellt kommer metoder för att minska störningskänsligheten för materialstrukturen vid ultraljudsprovning att undersökas.

En försöksserie med 10 kopparlock har tillverkats med syfte att på ett systematiskt sätt hitta de bästa processparametrarna med befintliga verktyg i den smidespress som används för provtillverkning. Därefter har en demonstrationsserie med 10 lock utförts med parametrar baserade på utfallet från försöksserien. Resultaten visade att materialstrukturen var godkänd och att hållfasthets-egenskaperna uppfyller tillverkningskraven. Lockämnen fick även god geometrisk form och kunde maskinbearbetas till lock på tillfredställande sätt. Med nuvarande smidesmetod utsätts locken dock för kallbearbetning. Processoptimering och försök med avspänningsglödning för att eliminera kallbearbetning pågår.

Program

Den fortsatta utvecklingen av tillverkningstekniken för kapselns kopparkomponenter omfattar att:

- Studera processsystemet för extrusion utgående från ny kunskap om orsaker till kornstorleksvariationer och om möjligt implementera erforderliga modifieringar i systemet.
- Genomföra och utvärdera en demonstrationsserie för att fastställa vilken materialstruktur som kan uppnås för extruderade rör.
- Fortsätta utvecklingen av tillverkning med dornpressning och smidning.

- Fortsätta studierna av kallbearbetningseffekter i koppar samt processoptimering av nuvarande smidesmetod för locktillverkning. Även andra smidesmetoder kan komma att utvärderas.

11.5.2 Provning av kopparkomponenter

Under de senaste åren har SKB fokuserat på att implementera de preliminära provningsmetoder för kvalitetskontroll av kopparkomponenter som redovisades i Fud-program 2007 samt att utvärdera metodernas tillförlitlighet. Arbetet som genomförts inom oförstörande provning finns sammanställt i /SKBdoc 1179633/.

Instruktioner för kvalitetssäkring har tagits fram för ultraljudsprovning av kopparkomponenterna med phased array-teknik. Ett tjugotal kopparrör och lika många kopparlock har provats med denna teknik, varvid endast enstaka små defekter har indikerats. Provningen har visat att ljuddämpningen varierar i komponenterna vilket i vissa fall medför att detekteringsförmågan försämras.

De preliminära provmetodernas tillförlitlighet har studerats i samarbete med BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung). Phased array-tekniken har studerats på artificiella referensdefekter (flatbottenhål) och resultaten visar på en detekteringsförmåga (a_{90/95}) inom ett intervall av 2–5 millimeter.

Arbetet med acceptanskriterier för provningen av kopparkomponenter följer inte samma modell som för insatsen. Koppar är inte känsligt för brottanvisningar, varken vid plastisk töjning eller kryptöjning. Dessutom är kopparhöljet lastbärande endast vid lyft. De acceptabla defekter som framkommit vid skadetålighetsanalysen för lyft i locket är baserade på gränslastberäkningar och är mycket stora. Detta innebär att detekteringskraven som utgår från defekternas inverkan på korrosionsbarriärens tjocklek blir jämförelsevis betydligt strängare. Acceptanskriterier för OFP måste underbyggas med beskrivning av möjliga defekter. Hittills har defekter förekommit mycket sparsamt vid provtillverkning. Endast något enstaka smidesfel i locken har påvisats, trots omfattande provning av både rör och lock/bottnar. Kunskapsuppbyggnaden om olika defekter och hur de kan detekteras kommer att fortsätta, liksom arbetet med att förtydliga detekteringskraven för dessa defekter. Detta planeras ske dels genom flödessimuleringar av dornpressnings- och extrusionsprocesserna vilket ger information om möjliga riktningar och positioner hos naturliga defekter, dels genom att i laboratorieskala ta fram varmformat material där processen störs så att defekter uppstår.

Nuvarande provmetoder kommer att kompletteras med ytavsökande metoder för att öka detekterbarheten av ytliga defekter och även deformerande slagskador som kan ge upphov till kallbearbetningseffekter.

Program

Utvecklingsarbetet för provning av kopparkomponenter omfattar att:

- studera möjliga defekttyper i varmformat koppar och karakterisera dessa, samt ta fram detekterings- och storleksbestämningskrav för dessa,
- vidareutveckla teknik för ultraljudsprovning, bland annat för ytkontroll av kopparkomponenterna,
- utreda vilken effekt varierande kornstorlek har på detekteringsförmågan för ultraljudsteknik och utifrån detta optimera tekniken.

11.6 Förslutning och provning av svetsen

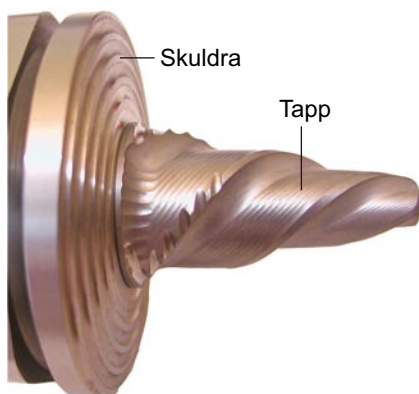
11.6.1 Förslutning

SKB kunde i Fud-program 2007 redovisa att svetsgodset vid friktionssvetsning i de flesta fall har likvärdiga kemiska och mekaniska egenskaper som grundmaterialet. Undersökningar visade dock att vissa defekter som oxidinneslutningar eller foglinjeböjning kan förekomma. Myndigheten ansåg i granskningen av Fud-program 2007 att det återstod för SKB att genom fler prover visa att oxidpartiklar kan elimineras och foglinjeböjning kan bemästras. Myndigheten påpekade också att det är av stort intresse att SKB fullföljer sitt program för att automatisera FSW-processen för att i framtiden kunna få så hög repeterbarhet som möjligt.

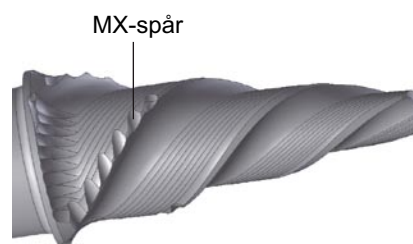
I och med valet av FSW som referensmetod år 2005 inriktades forskning, utveckling och demonstration på denna metod /SKBdoc 1175162, 1175236/. Efter 75 lock- och bottenhetsvar (locksvets görs med insats och bottenhetsvets utan insats) bestående av nästan 350 separata svetscykler kan såväl svetsprocessen som svetsystemet anses som robust och stabilt.

Innan arbetet med att automatiskt reglera svetsparametrarna inom processfönstret påbörjades optimerades svetsprocessen med avseende på stabilitet och repeterbarhet inom ett så brett processfönster som möjligt. Detta resulterade i nya parameterinställningar och ny utformning av verktygsskuldran, se figur 11-3. Dessutom har verktygstappens utformning förändrats för att optimera dess livslängd, det vill säga säkerhetsfaktorn mot brott, eftersom en tapp endast avses användas vid en svets. Först visade sig en ytbeläggning, kromnitrid (CrN), med god fullvarvsvetsning utan påvisbar sprickbildning på tappens yta. För att ytterligare minska risken för brott minskades de så kallade MX-spårens längd. I de fall sprickor uppstått vid svetsning var de lokaliserade till MX-spår 22–25 millimeter ner från skuldran, där verktygsbrott skett vid tester med maximal verktygstemperatur. Därför har verktyget numer MX-spår bara 17 millimeter ner från skuldran, se figur 11-4.

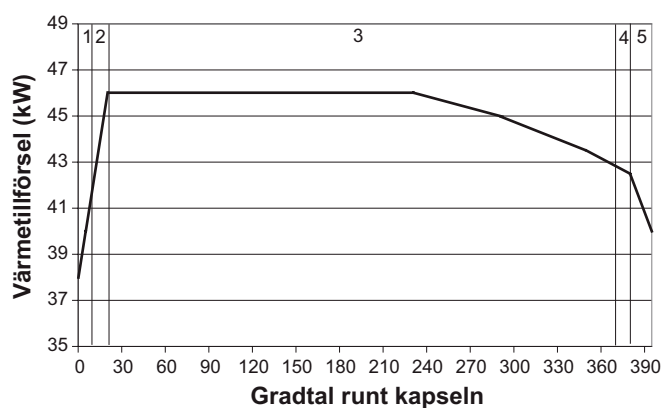
Vid flera fullvarvsvetsningar utförda i samband med optimering av svetsprocessen med avseende på processens stabilitet och repeterbarhet (parameterstudie) visade det sig att den värmeförsel som behövs för att hålla verktygstemperaturen vid cirka 850 °C var repeterbar. På grund av att de termiska förhållandena under en svetscykel varierar, till exempel vid nedgång till respektive uppgång från foglinjen, måste värmeförseln varieras under cykeln, se figur 11-5.



Figur 11-3. Svetsverktyg med så kallad konvex skuldra.



Figur 11-4. Tapp med MX-spår endast 17 millimeter ner från skuldra.



Figur 11-5. Erforderlig värmeförsel för verktygstemperatur på 850 °C som en funktion av läge i svetscykeln. Sekvenser i svetscykeln: 1. acceleration, 2. nedgång, 3. foglinjesvetsning, 4. överlappsvetsning och 5. parkering.

Den enda materialavvikelse som förekommer vid svetsning inom det relativt stora processfönstret (790–910 °C för verktygstemperaturen) är den så kallade foglinjebøjningen, som uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen i riktning mot ytan. Det är framför allt vid överlappssekvensen som tappens spets kommer för djupt. Foglinjebøjningen kan reduceras avsevärt med ett kortare verktyg, vilket har visats i en mindre svetsserie som utfördes efter demonstrationserien. En rimlig bedömning är att i produktion kan foglinjebøjningen begränsas till en radiell utbredning av två millimeter.

Omfattande tester har gjorts av locksvetsar utförda vid Kapsellaboratoriet för att bedöma svetsarnas långtidsegenskaper och hur väl svetsgodset uppfyller specifikationen för referenskapseln. Svetsgodset har visat sig uppfylla kraven avseende materialsammansättning, materialegenskaper och dimensioner.

I Fud-program 2007 presenterade SKB tester av svetsgodsets mekaniska och kemiska egenskaper. Därefter har SKB gjort kemiska analyser av svetsgodset i ett flertal mätpunkter i flera locksvetsar /SKBdoc 1175162/. Tre mätpunkter längs svetsgodsets radiella centrumlinje topp, mitt och rot från både enkelsvetsområdet och överlappsområdet har analyserats tillsammans med en referenspunkt i locket. Resultaten visar att vid undersökning av svetsgodset från svetsning i luft varierar syrehalten från cirka 3 till 44 ppm. Detta visar att svetsgodset kan innehålla partier eller stråk med små mängder av oxidinneslutningar, primärt orienterat till överlappsområdet. Vid undersökning av svetsgodset från en svetsning i skyddsgas med argon har syrehalten varierat mellan 1 och 2 ppm vilket indikerar att oxidinneslutningar i svetsgodset kan minimeras eller förhindras om svetsningen sker i skyddsgas. En större kartläggning av förekomsten av oxidinneslutningar och deras inverkan på svetsgodsets egenskaper pågår.

Analyserade koncentrationer av fosfor, svavel och väte i svetsgodset (se tabell 11-2) är acceptabla och jämförbara med nivåerna i grundmaterialet. Även förekomsten av metalliska grundämnen har analyserats eftersom små partiklar från verktygstappen kan släppa och blandas i svetsgodset. Verktygstappen, som är tillverkad av Nimonic 105 som består av grundämnena nickel, krom, kobolt, aluminium och titan, ytbehandlas numera med kromnitrid (CrN). Ytbehandlingen har reducerat mängden nickelpartiklar i svetsgodset.

Program

Svetsförsöken har visat att repeterbarheten och tillförlitligheten i svetsprocessen är mycket hög, men fortsatt optimering av såväl process som system behövs. De steg som återstår är att:

- driftsätta regulatormen och sedan optimera regulatorns inställningar och funktion, så att mänskliga faktorn elimineras så långt som möjligt,
- svetsa fler lock i argongas för att få en bättre bild av svetsgodsets egenskaper, eftersom den provisoriska skyddsgaskammaren endast använts vid en fullvarvssvetsning. Figur 11-6 visar den skyddsgaskammaren som planeras att användas vid flertalet locksvetsar,
- anpassa utvecklingsarbetet avseende svetsens mikrostruktur och förekomst av oxider till resultaten från pågående materialundersökningar av svetsgodset vid bland annat KIMAB och Helsingfors tekniska högskola,
- ta fram underlag för systemen i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen.

Tabell 11-2. Koncentration av fosfor, svavel och väte samt metalliska grundämnen i svetsgodset.

	Koncentration i svetsgodset (ppm)		
	Svetsar (FSWL27, 35, 36) – verktyg utan ytbehandling	Svets (FSWL69) – verktyg med ytbehandling	Svets (FSWL51) – verktyg utan ytbehandling, med skyddsgas
Ni	21	< 1	9
Co	9	< 1	3
Cr	5	< 1	3
P	52,7	49,5	61,5
S	4,4	< 5	4,3
H	0,31	0,3	0,55
O	17	32	1,6



Figur 11-6. Illustration av den nya skyddsgaskammaren.

11.6.2 Provning av svetsar

Erfarenhetsuppbyggnaden från provningen av svetsarna har främst skett som återkoppling till utvecklingen av svetsprocessen. När det gäller möjliga defekter är kunskapsläget för svetsar bättre än för varmformad koppar, eftersom svetsystemet finns på Kapsellaboratoriet och är småskaligt i jämförelse med de industriella processerna smidning, extrusion och dornpressning. När det gäller detekteringskraven för olika defekter pågår optimering av svetsprocessen, inklusive förändringar i verktygsutformning och parametersättningar. I detta ingår att etablera ett säkert processfönster. Det kan inte uteslutas, även om sannolikheten är låg, att nya typer av defekter kan genereras i den nya processen. Detta kommer att undersökas genom olika processprov. Om skäl finns kommer OFP-metoderna att optimeras för att påvisa nya typer av defekter. En speciell fråga som kommer att utredas ytterligare är möjlig uppkomst av volumetriska defekter i svetsprocessen, vilket avgör om svetsarna behöver röntgas. Liksom för kopparhöljet i övrigt kommer metoder för att påvisa ytliga defekter att utvecklas.

Program

Utvecklingsarbetet för provning av svetsar omfattar att:

- studera möjliga defekttyper i svetsar och karakterisera dessa. Ta fram krav för detektering och storleksbestämning av dessa,
- vidareutveckla teknik för ultraljudsprovning,
- studera tillförlitligheten hos olika OFP-metoder för provning av svetsen. Speciellt utreda om röntgen behöver användas,
- utveckla teknik för ytkontroll av svetsar,
- ta fram underlag för OFP-systemen i inkapslingsanläggningen.

11.7 Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret

Hantering och deponering av kapseln i slutförvarsanläggningen avser hela hanteringskedjan, från det att kapseln i sin transportbehållare (KTB) anländer till terminalbyggnaden ovan mark tills den är kontrollerad och deponerad, det vill säga:

- Transport i rampen av kapseln i KTB.
- Omlastning av kapseln till deponeringsmaskinen på förvarsnivån.
- Deponering av kapseln.

Myndigheten efterfrågade i granskningen av Fud-program 2007 information om hur långt SKB hunnit i utvecklingen av hanteringskedjan för kapseln vid slutförvarsanläggningen. Myndigheten har också efterfrågat en redovisning av hur lastning, lossning och deponering av kapseln ska ske och vad som måste automatiseras på grund av strålning.

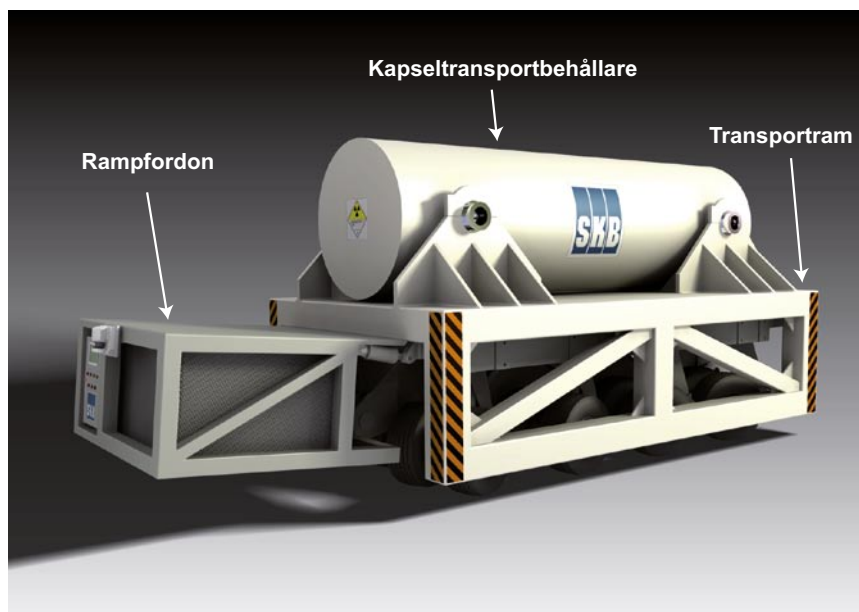
11.7.1 Transport i rampen

Nertransport av kapseltransportbehållaren (KTB) till förvarsnivå ska göras via nedfartsrampen med ett fordon som är speciellt avsett för detta. En KTB med kapsel väger cirka 85 ton.

Under perioden 2007–2009 har en förstudie gjorts av kravbilderna för transporterna och lämpliga transportlösningar. Studien visar att ett koncept där KTB:n transporteras på en separat lastbärande ram har stora fördelar. Det ger en rationell hantering av KTB:n och underlättar bärgning av fordonet vid ett eventuellt haveri i rampen. En fordonslösning kallad ”Self Propelled Modular Transporter (SPMT)” har visat sig lämplig, se figur 11-7. Denna har en moduluppbyggnad vilket förenklar reparationer och komponentbyten. SPMT är en serietillverkad produkt och bedöms efter vissa modifieringar klara kraven för ramptransporten.

Program

Under perioden 2011–2013 planerar SKB att förtydliga kraven och förbereda underlaget inför en framtida upphandling. Möjligheterna att samordna utformningen av lastbärande ramar med terminaltransporterna kommer att ses över. Avsikten är att köpa in ett fordon med snarlika egenskaper som det framtida rampfordonet. Med det fordonet ges möjlighet testa rampfordonskonceptet och detaljprova tekniska lösningar.



Figur 11-7. Koncept för fordon för nedtransport av kapslar via rampen.

11.7.2 Deponering

SKB har tagit fram en ny deponeringsmaskin som levererades till Äspölaboratoriet hösten 2008. Maskinen har testats i manuell drift under drygt 1½ år. Parallellt med de manuella testerna har maskinen försetts med ett avancerat navigations- och positioneringssystem.

Program

I planerade fullskaliga tester vid Äspölaboratoriet ska den nya deponeringsmaskinen utföra cirka 1 000 deponeringar under en tvåårsperiod. Tester av navigationssystemet ingår. I slutförvaret ska deponeringsmaskinen förflytta sig från centralområdet till deponeringstunneln och utvalt deponeringshål. Den mest kritiska delen i navigationssekvensen, när maskinen gränslar strålskärmssluckan, ingår i de tester som genomförs i Äspölaboratoriet. Deponeringsmaskinen är även utrustad med ett positioneringssystem som medger att kapseln placeras centrerat i bufferringarna i deponeringshålet.

De fullskaliga testerna beräknas kunna avslutas under 2011. De huvudsakliga syftena är att:

- samla och utvärdera data om maskinens och delsystemens tillförlitlighet och tillgänglighet vid helautomatiserad drift,
- verifiera att deponering med helautomatiserad navigering och positionering kan utföras med tillfredställande noggrannhet och säkerhet,
- sammanställa vilka serviceinsatser som krävs vid kontinuerlig drift.

12 Teknikutveckling buffert

Buffertlinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av den buffert som omger kapseln i deponeringshålet. I detta kapitel beskrivs buffertens referensutformning översiktligt, de krav som ställs på bufferten för att uppnå initialtillståndet samt den teknikutveckling som enligt SKB:s planer kommer att genomföras under de kommande åren. Parallellt med och som underlag för teknikutvecklingen pågår fortsatt forskning och utveckling kring lerbarriärerna. Detta redovisas i kapitel 24 i del IV.

12.1 Krav och förutsättningar

Buffertens funktion är att hindra strömmande vatten från att komma i kontakt med kapseln och det använda bränslet. Eventuell transport av korrosionsprodukter och radionuklider genom bufferten ska domineras av diffusion. Vidare ska bufferten begränsa påfrestningarna på kapseln vid eventuella förskjutningar i berget. För att klara dessa uppgifter måste den hydrauliska konduktiviteten vara låg. Vidare måste bufferten behålla sina dimensioner och kunna självläka, det vill säga eventuellt uppkomna sprickor och inhomogeniteter ska tillslutas när bufferten sväller så att funktionen upprätthålls. Bufferten ska också vara fysikaliskt och kemiskt stabil i ett långt tidsperspektiv.

Kraven på bufferten är alltså huvudsakligen relaterade till dess barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret. För att säkerställa barriärfunktionen har följande krav på installerad buffert formulerats /12-1/:

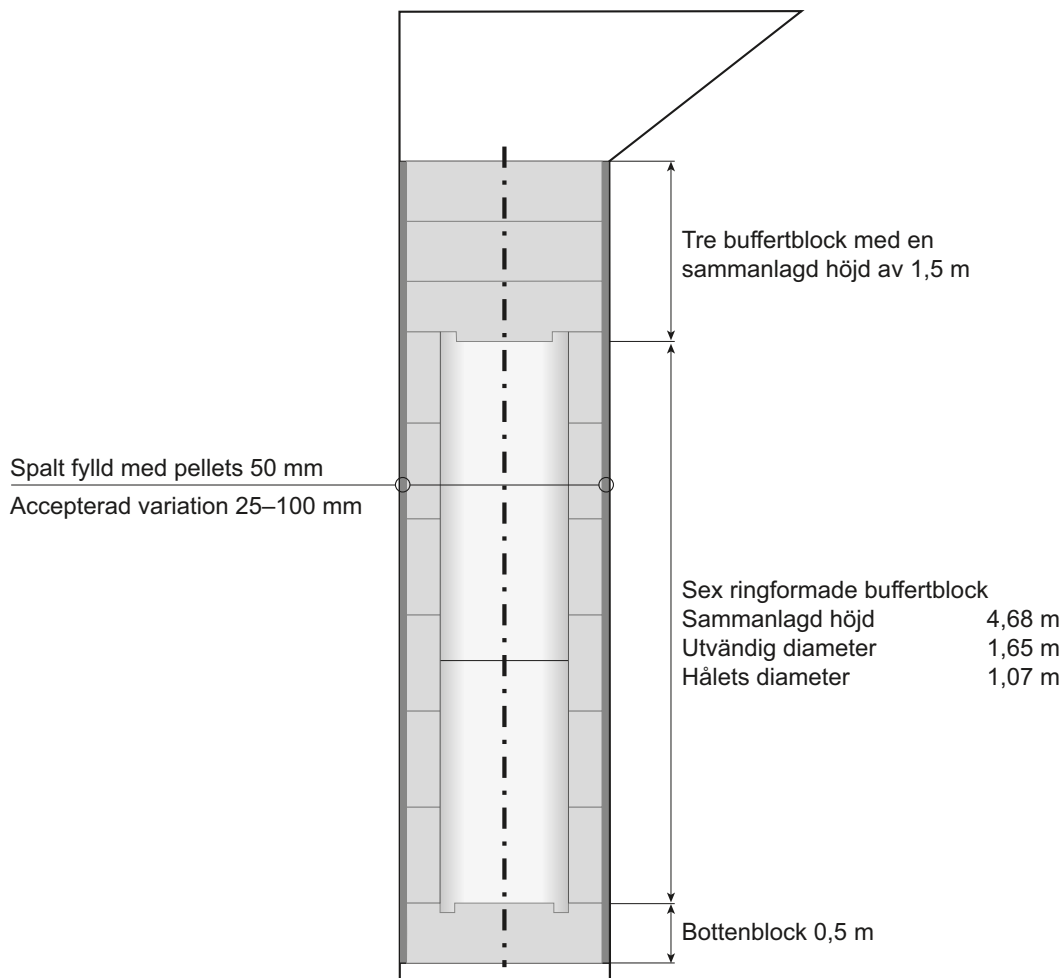
- halten av lermineralet montmorillonit i buffertmaterialet ska vara 75–90 procent av den totala torrvikten,
- innehållet av organiskt kol i buffertmaterialet ska vara mindre än en procent,
- totala svavelinnehållet får inte överstiga en procent, samtidigt får sulfidhalten inte överstiga 0,5 procent,
- den installerade buffertens vattenmättade densitet ska vara mellan 1 950–2 050 kg/m³,
- buffertens dimensioner ska vara i enlighet med SR-Can /12-2/,
- temperaturen i bufferten får inte överstiga 100 °C,
- minsta svälltryck, största hydrauliska konduktivitet, styvhet och hållfasthet ska bibehållas vid förändringar av temperatur, tryck och rörelser i bufferten.

Därutöver finns krav relaterade till produktion och drift. Allmänt formulerat ska bufferten baseras på väl beprövad eller testad teknik. Buffert med specificerade egenskaper ska vara möjlig att producera och installera med hög tillförlitlighet.

12.2 Nuläge och program

Utifrån de krav som redovisas i föregående avsnitt har SKB tagit fram en referensutformning för bufferten. Enligt denna består bufferten av enaxligt kompakterade block och ringar tillverkade av bentonitlera typ MX-80. Spalten mellan buffertblocken och deponeringshålets vägg fylls med pellets, se figur 12-1. Förutom buffertmaterialets sammansättning omfattar referensutformningen även tillverkningsprocessen och vald installationsteknik. Buffertblock och kapsel ska kunna installeras upp till tre månader innan den yttre spalten fylls med pellets och deponeringstunneln återfylls. För att klara detta innefattar referensutformningen ett buffertskydd och en bottenplatta, anpassad för att ansluta till buffertskyddet.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2007 att SKB bör ta fram en mer detaljerad beskrivning av vilken teknik som ska användas under installation av buffert för att förhindra alltför snabb vattenmättnad. Beträffande tillverkningsprocessen av buffertblocken påpekade SKI att SKB övergivit isostatisk pressning som referensmetod för bufferttillverkning, utan att ange något skäl för detta. Vidare anförde SKI att SKB inte har redovisat vad som bör ingå i ett program för



Figur 12-1. Referensutformning för bufferten.

kvalitetssäkring för bufferten. SKI och Kärnavfallsrådet ansåg det vara nödvändigt att SKB tar fram ett kvalitetsprogram för bufferttillverkningen. SKI framförde också att ytterligare provtillverkning kan behövas för att visa att tillräckligt hög kvalitet för valt material kan uppnås vid omständigheter som mer liknar serietillverkning. Beträffande valet av material till bufferten framhöll SKI att bentonit har en komplex och varierande kemisk och mineralogisk sammansättning och att detta har betydelse för buffertens långsiktiga utveckling. Därför behöver SKB, förutom att ange minimal halt av montmorillonit, även ange haltintervall för andra mineral, exempelvis vissa spårmineral, som kan ha en påverkan på långsiktig säkerhet. Vidare bör SKB, för att utnyttja resurserna på ett optimalt sätt, ta fram en plan för vilket material som ska användas i olika nya försök.

SKB har sedan 2007 utvecklat och gjort försök med både buffertskyddet och bottenplattan. Komponenterna har testats i stor skala vid Äspölaboratoriet. Vidare har system för läns hållning i deponeringshål under installation testats /12-3/.

I Bentonitlaboratoriet har SKB undersökt funktionen av den yttre spalten som är fylld med pellets av bentonit. Syftet med dessa försök har varit att studera hur bufferten påverkas av inflödande vatten. De fenomen som har studerats är erosion av bentoniten, hävning av buffertblock samt uppbyggnad av vattentryck i bufferten /12-4/.

Sedan Fud-program 2007 redovisades har SKB pressat ett femtontal fullskaliga buffertblock för försöken vid Äspölaboratoriet. Vid tillverkningen av dessa block har bentoniten konditionerats genom att på plats blanda in vatten i leran, se figur 12-2.

Tillgången på bentonit på världsmarknaden är mycket stor. Flera leverantörer kan i dag leverera en produkt som uppfyller SKB:s krav på material till bufferten /12-5/.



Figur 12-2. Till vänster: Blandare av typ Eirich som använts för konditionering av bentonit vid Äspö-laboratoriet. Till höger: Ett bentonitblock placeras på en transportpall.

Enligt SKB:s leveransstyrmodell (se avsnitt 9.2) har teknikutvecklingen för bufferten passerat konceptfasen och befinner sig i konstruktionsfasen. De insatser som ska genomföras före byggstart har delats upp i tre delar. Dels sker systemkonstruktion inom vald referensutformning. Här beskrivs referensutformningen, hur långt man har kommit i utvecklingen samt förslag till fortsatt utveckling. Parallellt med utvecklingen av referensutformningen utvecklas och utvärderas även alternativ till denna. Dessa två delar av utvecklingsarbetet kommer att drivas i var sitt projekt (se avsnitt 12.2.1 och 12.2.2). Den tredje delen avser utvecklingen av tillverkningsprocessen för buffertblock (se avsnitt 12.3). Dessutom kommer viss teknikutveckling för bufferten att ske inom projektet ”Brytning av yttersektionen av Prototypförvaret” (se avsnitt 12.4).

12.2.1 Systemkonstruktion av buffert

I samband med att referensutformningen för bufferten togs fram såg SKB ett behov av att, inom ramen för vald referensutformning, vidareutveckla tekniken för installation av bufferten för att få en effektiv arbetsprocess. Till stora delar har de olika komponenterna i referensutformningen testats tidigare, både i laboratorium och i fältförsök. De områden där det kvarstår behov av tester och vidareutveckling beskrivs i följande avsnitt. Alla komponenter som ingår i referensutformningen för bufferten ska testas tillsammans, som en del av systemkonstruktionen (se avsnitt 12.2.1, Fullskaletester av referensutformningen). Resultat från arbetet kommer att ligga till grund för detaljkonstruktionen av dessa komponenter.

Komponenter i referensutformningen

De komponenter inom referensutformningen som behöver vidareutvecklas är bottenplattan, buffertskyddet, strålskyddet och körplåten. Bottenplattan ska ge en plan och horisontell yta på vilken bentonitblocken kan staplas vertikalt, samt fungera som infästning för buffertskyddet. Enligt referensutformningen består den av en kopparplatta ingjuten ovanpå en cementplatta; andra lösningar kommer att övervägas. Buffertskyddet ska förhindra att vatten tas upp av bufferten under installationsfasen. Strålskyddet ska ge skydd under inplaceringen av kapsel och buffert. En prototyp för strålskyddet finns och testas. Efter att buffert och kapsel har placerats i deponeringshålet täcks hålet med en körplåt. Den ska förhindra att material kommer ner i deponeringshålet och underlätta arbetet med installation av återfyllningen. Utvecklingen av dessa komponenter har påbörjats. I det fortsatta utvecklingsarbetet är det viktigt att alla komponenterna fungerar tillsammans och att de uppfyller de krav och förutsättningar som redovisas i avsnitt 12.1.

Utrustning för installation

Innan kapseln placeras i deponeringshålet ska bufferten av högkompakterad bentonit, i form av block och ringar, vara på plats. För installation av bufferten krävs utrustning som klarar att både lägga ned bentonitringar och bentonitblock i deponeringshålet och, om så skulle behövas, ta upp dem igen. En sådan utrustning har tagits fram i prototyputförande. Den består av en bockkran samt ett vakuumllyftverktyg, se figur 12-3. Utrustningen är försedd med ett positioneringssystem för att blocken ska hamna i exakt rätt positioner i deponeringshålet. Under 2009 påbörjades tester av vakuumllyftverktygets funktioner. I testerna ingår att visa att toleranskraven för bufferten kan uppfyllas.

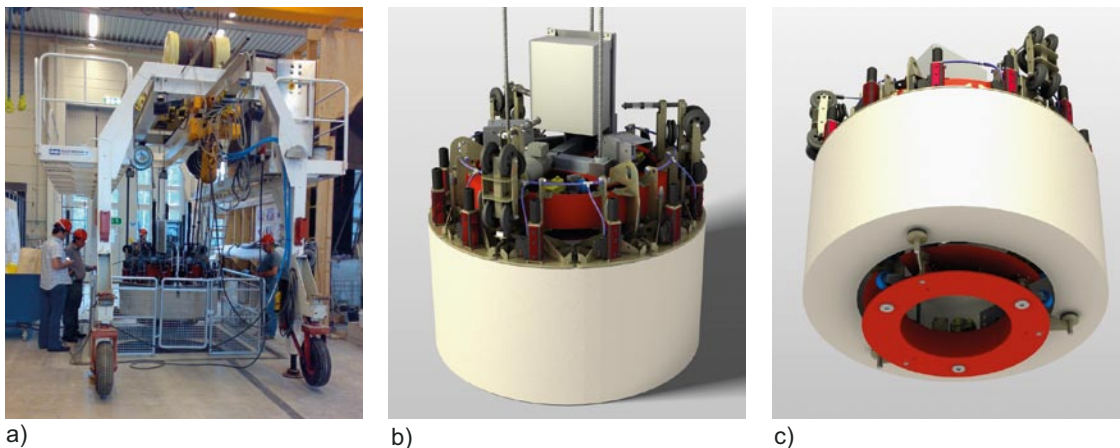
Under detaljkonstruktionsfasen kommer prototypen för lyftverktyget att samprovas med en prototyp av en buffertnedläggningsmaskin försedd med navigeringssystem. Genom prototyptesterna ska SKB visa att samtliga moment vid buffertnedläggningen kan genomföras under de förhållanden som kommer att gälla vid rutinmässig drift.

Utvecklingsprogrammet för installation av bufferten omfattar tester och demonstration av metoden vid både Bentonitlaboratoriet och Äspölaboratoriet. De planerade testerna och demonstrationerna syftar till att bekräfta att den valda metoden och lyftverktyget fungerar som planerat. Provingen av lyftverktyget har påbörjats vid Bentonitlaboratoriet. Till testerna används skalenliga block och ringar av betong. Senare kommer tester att genomföras i tunnlar på 420 meters djup vid Äspölaboratoriet.

Vidare kommer en ny utrustning för att fylla spalten mellan buffertblocken och deponeringshålets vägg med pellets att konstrueras, tillverkas och testas. Kraven på utrustningen är preciserade. Bland annat ska utrustningen klara av att fylla spalten relativt snabbt och utan att det dammar för mycket.

Kontroll- och mätmetoder

För att säkerställa att referensutformningen verkligen erhålls kommer olika kontroller och mätningar att behöva utföras. Exempelvis behövs uppgifter om deponeringshålens dimensioner för att kunna bestämma precision och noggrannhet på den installerade buffertens densitet. Mätteknik och uppgifter om mätnoggrannhet för detta kommer att tas fram inom berglinjen. Ett annat exempel är mätmetoder för att bestämma bentonitens kemiska sammansättning. Metoder finns och har använts /12-5/ men för att bestämma metodernas noggrannhet behövs ytterligare utredningar och försök. Detta arbete bör leda till en bättre uppfattning om metodernas mätnoggrannhet.



Figur 12-3. Utrustning för inplacering av buffertblock: a) Vakuumllyftverktyg tillsammans med bockkran. b) Vakuumllyftverktyget sett snett uppfifrån. c) Vakuumllyftverktyget sett snett underifrån.

Test av funktionen för delkomponenter och delsystem

Enligt referensutformningen ska bufferten tillsammans med kapseln kunna vara placerad i buffertskyddet upp till tre månader innan buffertskyddet tas bort och den yttre spalten fylls med pellets. Under denna tid kan förändringar i buffertblocken uppkomma. Till exempel kan omfördelning av vatten orsaka sprickor i blocken. Detta har tidigare undersökts med laboratorieförsök. Kompletterande försök, både i laboratorieskala och i större skala med fullstora bentonitblock, ska genomföras. Vid försöken i laboratorieskala kan man antingen efterlikna den i förvaret förväntade temperaturdifferensen över bufferten (från kapsel till bergvägg) eller temperaturgradienten över bufferten. När man vid försök i laboratorieskala väljer att efterlikna temperaturdifferensen blir gradienten större jämfört med förhållanden i full skala. Försök i laboratorieskala kan därför ge påverkan på bufferten som inte uppstår i verkligheten. Försök i större skala är därför nödvändiga för att samtidigt kunna simulera både förväntad temperaturdifferens och temperaturgradienten över bufferten.

Försök har gjorts för att undersöka hur systemet med bentonitblock och pellets fungerar och reagerar när vatten tillförs. I försöken har studerats hur vatten transporteras och fördelas i den pelletsfyllda spalten samt hur stapeln av bentonitblock deformeras vid olika inflöden. Dessa försök har gjorts i laboratorieskala samt med fullskaleblock /12-4/. Kompletterande försök planeras.

Fullskaletester av referensutformningen

Tester för att studera hur de olika delkomponenterna fungerar tillsammans är viktiga. Bland annat avser SKB att göra försök där alla ingående komponenter i ett deponeringshål testas tillsammans. Dessa försök är planerade att genomföras vid Äspölaboratoriet under 2012, under förutsättning att de föreslagna nya komponenterna och utrustningarna har hunnit utprovas (se avsnitt 12.2.1, Komponenter i referensutformningen och Utrustning för installation).

12.2.2 Alternativ referensutformning

Referensutformningen inkluderar förutom utformning och komponenter även deponeringssekvensen, det vill säga tidsåtgång för och när i tiden buffert, kapsel och återfyllning ska installeras. Bergförhållandena i Forsmark, med mycket låg vattenföring hos berget på förvarsnivå innebär att det tillåtna inflödet av vatten i ett deponeringshål bör kunna minskas. Det är då troligt att installationen av bufferten kan förenklas, vilket i så fall medför att referensutformningen ändras. Därför planeras studier av alternativ till den valda referensutformningen. Dessa studier kommer även att beröra återfyllningen. Exempel på delar som kan behöva förändras är:

- *Buffertskyddet och vattenflödet till deponeringshålet.* Om installationen kan göras tillräckligt snabbt, eventuellt i kombination med skärpta krav på tillåtet inflöde i deponeringshålet, är det möjligt att buffertskyddet kan slopas.
- *Vattenkvot, dimensioner och densitet på installerade buffertblock och pellets.* Om buffertskyddet slopas kan bufferten behöva ändras för att den ensam ska kunna motstå inverkan av vatteninflöde i deponeringshålen. Exempelvis kan man behöva block med högre vattenkvot, andra dimensioner och/eller annan densitet.
- *Förenkling av bottenplattan.* Om kraven på bottenytans jämnhet och lutning kan minskas kan plattan förenklas eller eventuellt utgå.
- *Variationer i deponeringshålens geometri.* Om man kan visa att det går att producera deponeringshål med snävare toleranser, både då det gäller avvikelse från lodlinjen och variationer i hålets diameter, ökar förutsättningarna att även i ogynnsamma fall hamna inom det intervall som angivits för buffertdensiteten (1 950 till 2 050 kg/m³).
- *Noggrannhet i installation av kapsel och buffert.* Om toleranskraven på buffertblockens och kapselns lägen kan mildras så kan deponeringen förenklas.

12.3 Kompakteringsteknik

Två metoder kan användas för tillverkning av buffertblock, enaxlig och isostatisk kompaktering. Vid enaxlig kompaktering pressas bentonit till block i en styv form. Vid isostatisk kompaktering sker pressningen genom att ett allsidigt tryck appliceras på en flexibel form fylld med bentonit. Metoderna har testats av SKB med bra resultat och bedömningen är att båda ger block med likvärdig och acceptabel kvalitet.

Enaxlig kompaktering har valts som referensmetod för tillverkning av buffertblock. Valet motiveras av att SKB har visat att man med denna teknik kan tillverka buffertblock med god kvalitet och med dimensioner enligt referensutformningen. För isostatisk pressning av buffertblock med samma dimensioner krävs en större press än vad SKB för närvarande har tillgång till.

Vidareutvecklingen av enaxlig teknik kommer att fortsätta, och inriktas mot utprovning av nya lösningar för att minimera friktionen mellan form och bentonit. Den teknik som används i dag för att framställa stora buffertblock förutsätter att formen är konisk. Ny teknik för att minimera eller helt ta bort koniciteten kommer att utprovas. Försök kommer också att göras i syfte att tillverka block med högre höjd än i dag.

Posiva har genomfört och planerar ytterligare tester med isostatisk kompaktering av bentonitblock, i större skala än de försök SKB har gjort. SKB har för avsikt att genom samarbete med Posiva delta i dessa tester. Syftet är att förbättra underlaget för jämförelser mellan de två kompakteringsmetoderna avseende kvalitet, teknik och kostnad för produktion av buffertblock. Utfallet av jämförelserna ska ligga till grund för slutligt val av tillverkningsmetod. Detta val behöver göras i tid så att det kan ligga till grund för projektering av produktionsanläggningen.

12.4 Prototypförvaret

Flera storskaliga försök där buffertens egenskaper studerats har initierats, drivits och avvecklats vid Äspölaboratoriet. Exempel är *Återtagsförsöket (CTR) /12-6/* och *Temperature Buffer Test (TBT) /12-7/*. I båda dessa försök hade bufferten liknande utformning och dimensioner som i referensutformningen. Vatten tillfördes artificiellt till bufferten via filter på deponeringshålets vägg. Deponeringshålen förslöts med pluggar i hålets i övre del.

Det största storskaliga försöket i Äspölaboratoriet, *Prototypförvaret /12-8, 12-9/*, består av totalt sex fullskaliga deponeringshål i en deponeringstunnel som återfyllts med en blandning av bentonit (30 procent) och krossat berg (70 procent). Det övergripande målet med Prototypförvaret är att testa och demonstrera den integrerade funktionen av delkomponenter i ett slutförvar, under realistiska förhållanden och i full skala. Data från försöket jämförs med modellberäknade prognoser.

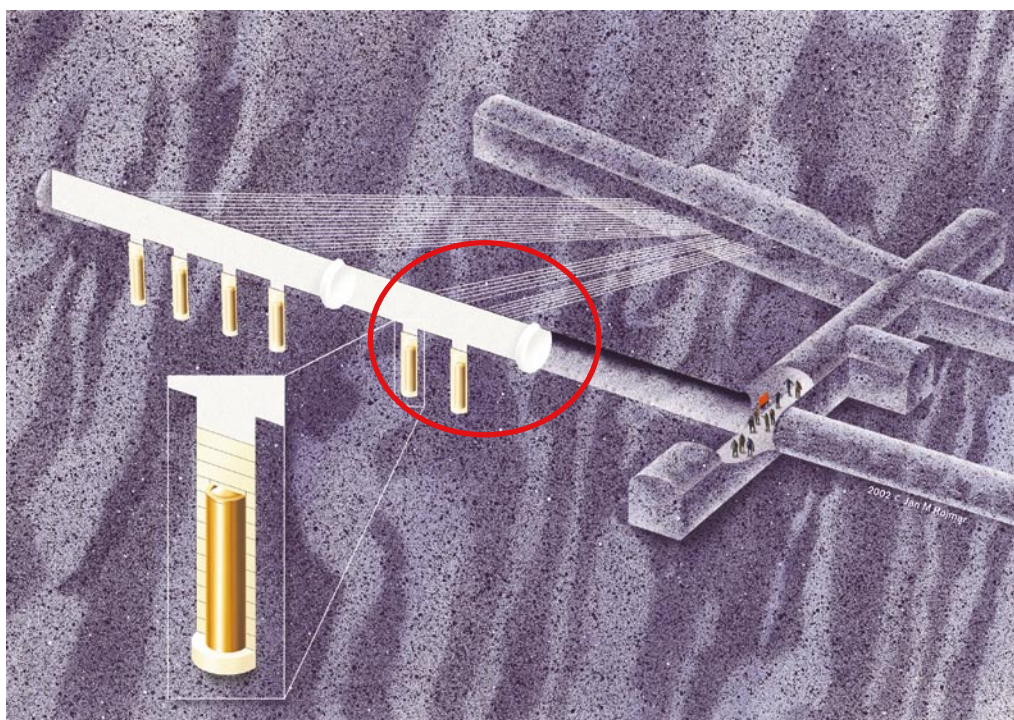
Försöket, som installerades under åren 2001 och 2003, är indelat i två sektioner. Enligt SKB:s planer kommer den plugg som avgränsar prototypförvaret samt den yttre sektionen med återfyllning och två deponeringshål att brytas under 2011 (se figur 12-4). I dessa två deponeringshål har bufferten tillförts vatten på naturlig väg via bergytan i deponeringshålen samt från återfyllningen i deponeringstunneln. Bufferten är inte vattenmättad och densitet och vattenkvot förväntas variera beroende på i vilken utsträckning vatten har kommit till bufferten.

För närvarande pågår planering av projektet. En detaljerad plan kommer att tas fram för hur brytningen ska genomföras, tidsåtgång, vilka resurser i form av maskiner och personal som krävs samt vilka kostnader detta kommer att medföra.

Målen med själva brytningen av försöket är att:

- genom omfattande provtagning få en bild av densitet och vattenmättnad hos buffert och återfyllning i den yttre sektionen av Prototypförvaret, samt att studera eventuella förändringar i bufferten. Bufferten har under försökets gång tagit upp vatten från omgivande berg. Vidare har den varit utsatt för höga temperaturer under lång tid. Den högsta temperatur som uppmätts i bufferten sedan uppvärmningen av den yttre sektionen startade år 2003 är cirka 85 °C. Detta kan eventuellt ha påverkat buffertmaterialets egenskaper. Sådana förändringar har studerats och kommer även framöver att studeras i försök som är speciellt utformade för detta,

- karakterisera kontaktytorna mellan buffert och återfyllning, respektive återfyllning och tunnelvägg, efter åtta års bevätning. Under brytningen kan dessa delar av buffert och återfyllning studeras i detalj,
- bekräfta eller förkasta indikationer på att det har skett små förändringar i bergmassan kring de två deponeringshålen. Mätningar under bevättnings- och uppvärmningsfasen tyder på att det har skett vissa förändringar av berget, bland annat små rörelser längs sprickplan. När återfyllning, buffert och kapsel tagits bort kan berget studeras i och kring deponeringshålen,
- bestämma kapslarnas lägen och form efter brytning. Kapslarna har varit utsatta för svälltryck från bufferten. Detta kan ha förändrat deras lägen, eventuellt också deras form,
- identifiera eventuell korrosion av kapseln. Utrustning för att studera korrosion av koppar i bufferten har installerats. Dessa mätningar kommer att kompletteras med provtagning av bufferten runt kapseln. Eftersom bufferten inte är vattenmättad har kapseln inte legat i syrefri miljö under försökets gång. Det är därför tveksamt om provtagningen kan bidra med någon kunskap relevant för frågan om kopparkorrosion under syrefria förhållanden. Vidare kan föroreningar, främst smörjmedel från tillverkningen av buffertblocken, försvåra analysen av kemiska processer på kapselytan,
- registrera eventuella förändringar eller skador på pluggen. Under en kort period av försöket har den yttre pluggen varit utsatt för höga tryck, vilket kan ha gett bestående påverkan,
- under brytningen studera biologiska och kemiska aktiviteter i buffert och återfyllning. Under försökets gång har vatten och gas provtagits och proverna har analyserats kemiskt och biologiskt. Provtagning under brytningen kan verifiera dessa analyser.



Figur 12-4. Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet. Enligt SKB:s planer kommer den markerade delen av försöket att brytas under 2011.

13 Teknikutveckling återfyllning

Återfyllningslinjen omfattar tillverkning, hantering och installation av återfyllning i deponerings-tunnlarna och i deponeringshålens översta delar. När en deponeringstunnel är återfylld byggs en plugg nära mynningen mot stamtunneln. Pluggen ingår som en del i återfyllningslinjen.

I detta kapitel beskrivs referensutformningen för återfyllning och plugg övergripande, de krav som ställs på återfyllningslinjen för att uppnå initialtillståndet /13-1/ samt den vidareutveckling av vald referensutformning som planeras de kommande åren. Återfyllningen redovisas i avsnitt 13.1–13.2 och pluggen i avsnitt 13.3–13.4. Delar av utvecklingsarbetet görs i samarbete med Posiva.

13.1 Krav och förutsättningar – återfyllning

Kraven på återfyllningen kan i huvudsak relateras till dess barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret, till krav på andra barriärer samt till produktion och drift av slutförvarsanläggningen.

Återfyllningens barriärfunktion är att begränsa vattentransporten i deponeringstunnlarna. Detta leder till följande krav:

- En hydraulisk konduktivitet $< 10^{-10}$ m/s.
- Ett svälltryck $> 0,1$ MPa.

Till barriärfunktionen hör också att begränsa buffertens uppåtriktade svällning i deponeringshålet. Med detta avses att återfyllningens densitet och deformationsegenskaper, vid initialtillståndet och efter fullständig vattenmättnad, ska vara sådana att buffertens svällning leder till en buffertdensitet vid vattenmättnad som inte understiger $1\,950\text{ kg/m}^3$, med tillräcklig marginal för materialförluster och osäkerheter.

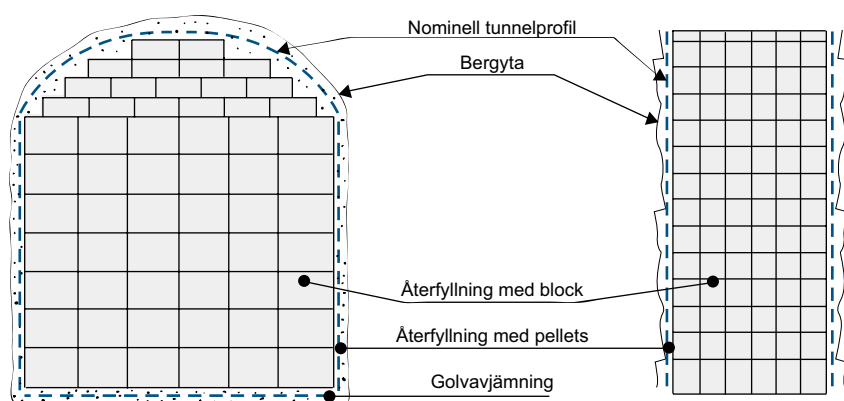
Återfyllningen får vidare inte ge upphov till betydande försämringar av andra barriärers barriärfunktion och ska bibehålla sin barriärfunktion under lång tid i den miljö som förväntas råda i slutförvaret. För att återfyllningen ska upprätthålla sin barriärfunktion måste densiteten vara tillräckligt hög i deponeringstunneln, sett över tvärsnitt och längd. För att uppnå detta densitetskrav vid installationen av återfyllningen ställs krav på deponeringstunnlarnas geometri samt på det maximala vatteninflöde som kan accepteras under installationen. Dessa krav redovisas i kapitel 15.

Därutöver finns krav relaterade till produktion och drift. Allmänt formulerat ska återfyllningen baseras på väl beprövad eller testad teknik. Återfyllning med specificerade egenskaper ska vara möjlig att producera och installera med hög tillförlitlighet.

13.2 Nuläge och program – återfyllning

Utvecklingen av ett återfyllningskoncept med naturligt svällande lera har pågått under lång tid. Sedan Fud-program 2007 redovisades har arbetet inriktats på att utveckla metoder och utrustning för den referensutformning som SKB valt. Referensutformningen bygger på återfyllning med förkompakterade bentonitblock och pellets. Tunnelgolvet och avfasningen till deponeringshålen fylls med pellets som kompakteras och avjämnas till en jämn och stabil yta. Bentonitblock staplas sedan på bädden och det utrymme som blir kvar mellan blockstapeln och tunnelväggen fylls med bentonitpellets.

SKI påpekade i sin granskning av Fud-program 2007 att SKB bör ta fram ett kvalitetsprogram för tillverkning och installation av återfyllning samt att SKB bör demonstrera att man kan hantera återfyllnaden under de förhållanden som kan förväntas råda på den valda platsen. Vidare ville SKI att SKB skulle redovisa planer för fullskaliga tester vid Äspölaboratoriet. Dessa aktiviteter har påbörjats och planeras att genomföras i systemkonstruktionsfasen för återfyllning, detta beskrivs i avsnitt 13.2.1–13.2.5.



Figur 13-1. Tvärsnitt och längdsnitt av en tunnel med återfyllningsblock och pellets.

Teknik och metoder för att bereda lera inför pressningen till block är kända och beprövade, likaså metoden att tillverka block med enaxlig pressning. Ännu har inte block i den storlek som specificeras i referensutformningen pressats, men det finns inga indikationer på att detta inte skulle vara möjligt, med samma goda resultat som vid pressning av mindre block.

Olika metoder för installation av block i deponeringstunnlar har studerats. Ett koncept har valts där förkompakterade bentonitblock inplaceras individuellt. Detta koncept är nu föremål för vidareutveckling, där prototyputrustningar för hantering och installation kommer att utvecklas och testas både vid Bentonitlaboratoriet och under mer realistiska förhållanden vid Äspölaboratoriet. Alternativet att installera moduler av block kan också vara intressant men är svårare att testa i stor skala /13-2/.

Sedan Fud-program 2007 redovisades har koncept för installation av pellets i spalten mellan bentonitblock och tunnelvägg utvecklats och testats /13-2/. För avfasningen av deponeringshålets övre del har ett alternativ med återfyllning med pellets/granuler testats vid Bentonitlaboratoriet. Preliminära resultat tyder på att det är möjligt att återfylla avfasningen med lermaterial i denna form. Metod och utrustning för detta behöver dock vidareutvecklas.

Tester har utförts för att förstå och kunna styra de processer som sker i pellettillfyllningen under installationsskedet. Syftet har varit att kunna avgöra vilket inflöde av vatten till deponeringstunneln som kan tillåtas under installationsskedet av återfyllningen. Detta arbete kommer att fortsätta för att säkerställa att återfyllningen uppfyller ställda krav.

SKB:s program för teknikutveckling av återfyllningen har passerat konceptfasen och är nu inne i konstruktionsfasen, som är indelad i systemkonstruktion och detaljkonstruktion (se avsnitt 9.3.5). Konstruktionsarbetet kommer att drivas med målet att systemkonstruktionen inom vald referensutformning ska kunna fastläggas inför byggstarten för Kärnbränsleförvaret. Därefter vidtar detaljkonstruktion och senare implementering.

Systemkonstruktion av återfyllning enligt leveransstyrmodellen innebär följande mål för utvecklingsarbetet:

- Vidareutveckla den konceptuella utformningen av barriären.
- Vidareutveckla den konceptuella konstruktionen av produktionssystemet för återfyllning.
- Verifiera att konstruktionsförutsättningar och kravspecifikationer uppfylls.
- Ta fram en kostnadssatt plan för industrialisering/implementering med kontrollmetoder som visar hur delsystemet kan implementeras och kontrolleras så att ställda krav uppfylls.
- Utföra teknisk riskanalys som omfattar risker relaterade till både konstruktionen och planerna för industrialisering/implementering med kontrollmetoder.

Arbetet omfattar följande områden:

- Val och specifikation av material.
- Installerad densitet och tunnelns geometriska konfiguration.
- Metoder för att tillverka och hantera återfyllningskomponenter.
- Metoder för att installera återfyllning i deponeringstunnlar.
- Metoder för att kontrollera material, komponenter och installerad återfyllning.

Under detaljkonstruktionen kommer den slutliga konstruktionen av den utrustning som behövs för produktion och installation av återfyllning att konstrueras och testas. Återfyllningsprocessen i sin helhet med dess kontrollmetoder kommer att testas i full skala och realistisk underjordsmiljö.

13.2.1 Val och specifikation av material

Halten av montmorillonit i återfyllningsmaterialet ska vara tillräcklig för att återfyllningen ska uppnå de krav som finns på hydraulisk konduktivitet och svälltryck. Montmorillonithalten påverkar även materialets kompressionsegenskaper och därmed förmågan att begränsa buffertens uppåtriktade expansion. Referensutformningen innebär en bentonitlera med en montmorillonithalt inom intervallet 45–90 procent.

Arbetet under systemkonstruktionsfasen syftar till att utöka dagens datamängd för återfyllningsmaterial och ta fram en strategi för hur olika material med varierande egenskaper kan hanteras under produktion och installation av återfyllningen.

Enligt referensutformningen används samma material till pelletsfyllningen som till blocken. Pelletsfyllningens egenskaper behöver dock optimeras med avseende på dess funktion i deponeringstunneln. Pelletsen sprutas in så snart som möjligt efter att en sektion med block installerats i deponeringstunneln. Tanken är att pelletsfyllningen ska ta upp inläckande vatten och på detta sätt skydda blocken under installationsskedet. Droppande vatten på blocken medför nämligen relativt snabbt erosion, vilket kan medföra instabilitet i blockstapel. Relaterat till denna optimering kommer arbete att bedrivas för att fastställa gränsen för acceptabelt vatteninflöde i en deponeringstunnel under installationsskedet. Utgångspunkt för detta arbete är de förhållanden som råder i Forsmark samt resultat från tidigare tester utförda vid Äspölaboratoriet och Bentonitlaboratoriet /13-3/.

13.2.2 Installerad densitet och tunnelns geometriska konfiguration

Tunnelns geometri påverkar vilken densitet som kan uppnås vid återfyllning. En jämn tunnelprofil med små stickningar gör att en större andel av tunnelprofilen kan fyllas med block, vilket resulterar i högre densitet /13-2/. Referensutformningen anger att minst 60 procent av tunnelvolymen ska vara återfylld med block och resterande del med pellets.

För att närmare studera hur tunnelgeometrin påverkar återfyllningens förmåga att begränsa buffertens uppåtsvällning planeras ytterligare modellering av gränssnittet buffert/återfyllning.

13.2.3 Tillverkning och hantering av komponenter och material

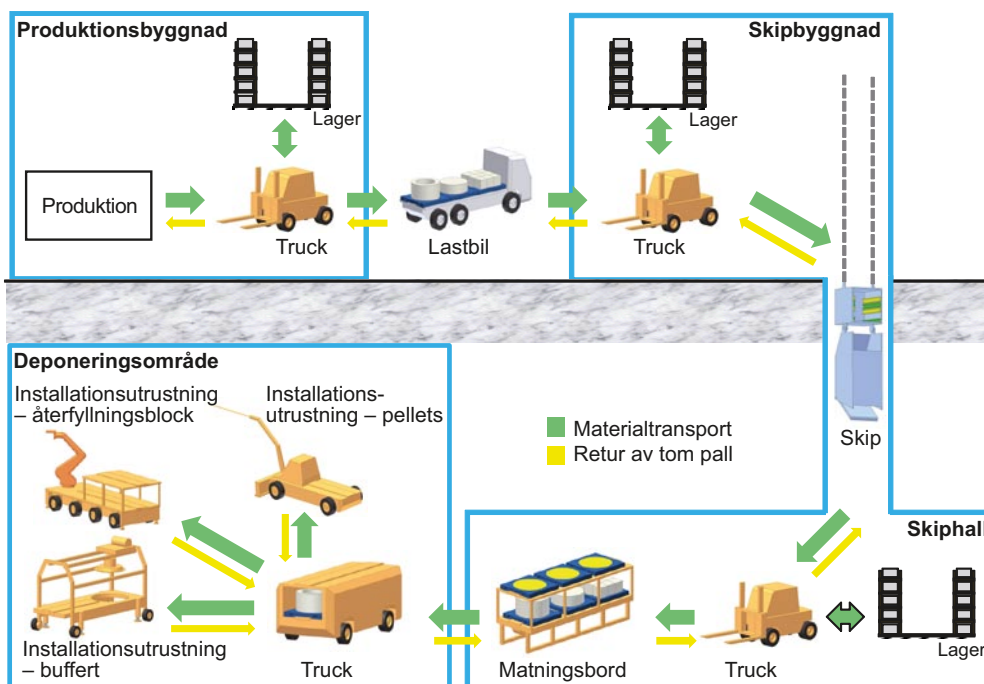
Återfyllningsblock tillverkas genom enaxlig pressning med kommersiellt tillgänglig utrustning och teknik, se figur 13-2. Pressning av ett stort antal mindre block har visat att block kan tillverkas med mycket små variationer i storlek och densitet /13-4/.

Under de närmaste åren kommer återfyllningsblock att pressas för användning i olika försök vid Äspölaboratoriet. Erfarenheterna från dessa pressningar kommer att ytterligare förbättra det statistiska underlaget som finns för pressning av återfyllningsblock.



Figur 13-2. Kommersiell press för blocktillverkning.

Ett övergripande koncept för att hantera, lagra och transportera återfyllningsmaterial och återfyllningskomponenter har tagits fram. Buffertmaterial kommer att hanteras med samma system, men återfyllningen utgör den volymmässigt dominerande delen. Komponenterna i hanteringskedjan visas schematiskt i figur 13-3. Utgångspunkten för användning av maskiner/utrustningar är att i första hand använda tillgänglig och beprövad teknik. I de fall specialutrustningar behöver utvecklas kommer prototyper att tas fram och testas under systemkonstruktionsfasen.



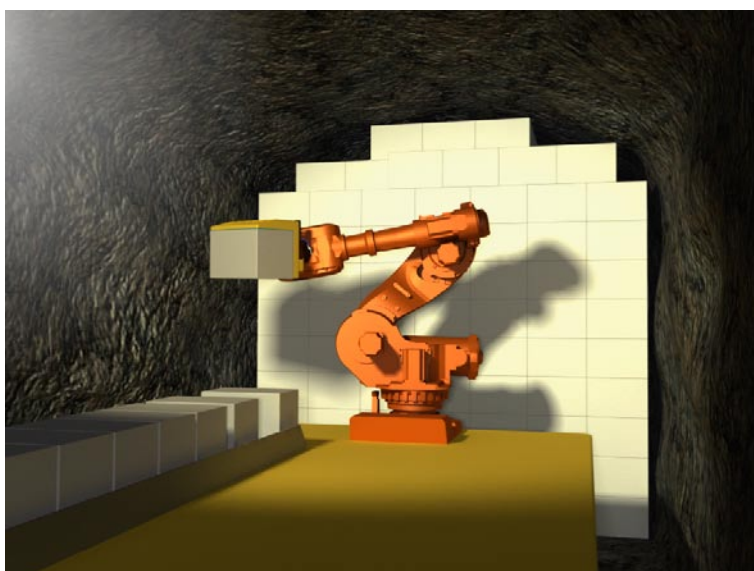
Figur 13-3. Övergripande koncept för transportsystemet för buffert och återfyllning.

13.2.4 Installation av återfyllning i deponeringstunnlar

Installationen av återfyllningsblock är ett moment i driften som kräver utrustning med hög kapacitet. Samtidigt ska arbetet utföras med precision för att minimera spalterna mellan återfyllningsblocken och därmed säkerställa en hög kvalitet (rätt densitet) på återfyllningen. Utrustningen måste även kunna förflyttas snabbt då återfyllningen görs i sektioner på 6–10 meter i taget, varvat med andra aktiviteter i deponeringstunneln. Detta innebär bland annat att utrustningen måste köras ut ur tunneln varje gång en kapsel ska deponeras.

Under perioden 2007–2010 har studier gjorts för att klargöra om hanteringen kan ske med manuellt styrda maskiner eller om robotteknik bör användas. Robottekniken bedöms som intressant att studera vidare då det finns robotlösningar tillgängliga på marknaden som klarar både miljön och kraven på kapacitet och precision. Studier har även gjorts av hanteringstekniken för blocken. Liksom för buffertblocken är det tänkt att använda vakuumenteknik för att lyfta blocken, då denna metod är skonsam mot blocken samt möjliggör att blocken kan placeras tillräckligt nära varandra.

Under systemkonstruktionsfasen fortsätter arbetet med datorsimuleringar av robottekniken för att i nästa steg genomföra fullskaletester vid Äspölaboratoriet. Parallellt kommer ett koncept att tas fram för den utrustning som ska bära återfyllningsutrustningen.



Figur 13-4. Robot för installation av återfyllningsblock.



Figur 13-5. Staplingstester utförda vid Bentonitlaboratoriet på Äspö.

13.2.5 Kontroll av material, komponenter och installerad återfyllning

Det är klarställt vilka parametrar som är viktiga att kontrollera under produktion och installation av återfyllning för att verifiera att återfyllningsprocessen uppfyller ställda krav och att initialtillståndet uppnås. I systemkonstruktionsfasen kommer det att fastställas vilken noggrannhet som behövs vid kontroller av viktiga parametrar. Kontrollmetoder kommer att vidareutvecklas och testas för att säkerställa kontrollmetodernas tillförlitlighet så att tillräcklig noggrannhet uppnås.

13.3 Krav och förutsättningar – pluggar

Deponeringstunneln försluts genom att en betongplugg byggs strax innanför tunnelöppningen. Förutsättningarna och kraven för pluggen har förändrats jämfört med den pluggkonstruktion som användes i prototypförvaret. Erfarenheter från pluggkonstruktionen i prototypförvaret beskrivs i /13-5/. Det primära kravet på pluggen är att den ska fungera som mothåll mot grundvattentrycket och det svälltryck som återfyllningen utvecklar i deponeringstunneln. Pluggkonstruktionen ska också hindra vattentransport ut ur deponeringstunneln.

Betongpluggen i sig kan inte säkerställa täthetskravet. Konstruktionen är därför uppbyggd av en pluggsektion, en tätningssektion och en filtersektion, se figur 13-4. Prefabricerade betongplank skiljer sektionerna ifrån varandra. Betongpluggen behöver förbli tät intill dess att bentonittätningen är fullt vattenmättad. Därefter ska bentonittätningen täta mot läckage och betongpluggen endast fungera som mekaniskt mothåll.

De tre viktigaste generella kraven som ställs på pluggkonstruktionen med avseende på dess funktion är följande:

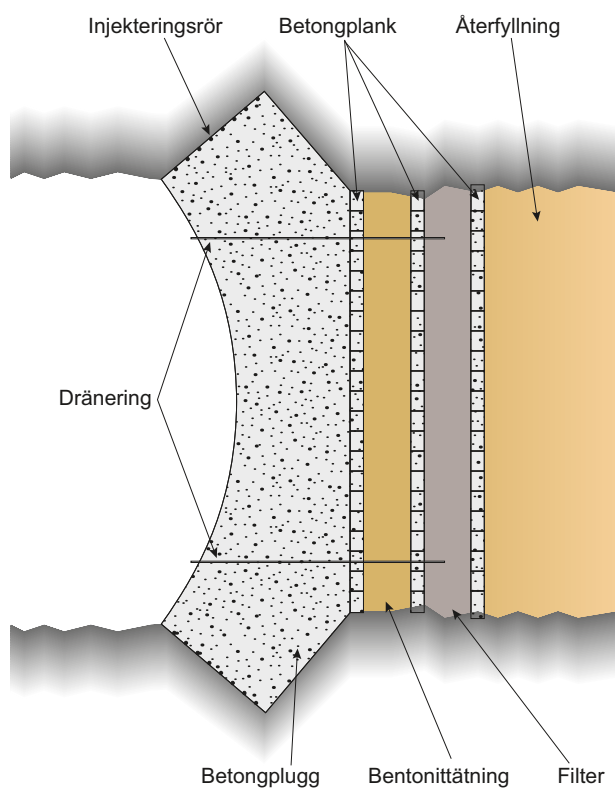
1. Betongpluggen och framför allt den anslutande bentonittätningen ska ombesörja att det vatten som läcker in till deponeringstunneln hålls kvar när tunneln är återfylld. Eftersom det vattentryck som byggs upp på det aktuella djupet är högre än bentonitens svälltryck kan bentonittätningen innanför betongpluggen till att börja med inte ta upp inrinnande vatten. Resultatet kan då bli så kallad *piping* (genomgående kanaler) och efterföljande erosion. Detta är skälet till att pluggen måste vara tät. Bentoniten tätar i allmänhet inte förrän tomrummen i buffert och återfyllning fyllts med vatten och vattentryck tas av pluggen.
2. För att betongpluggen ska vara tät måste den klara av den last som genereras av vattentrycket på pluggens insida.
3. Betongpluggen måste vara verksam tills dess att vattentrycket på pluggens utsida (mot transport-tunneln) är lika stort som på dess insida, det vill säga tills dess att det inte finns någon tryckgradient över pluggen.

13.4 Nuläge och program – pluggar

Utvecklingen av pluggen befinner sig i konstruktionsfasen. Arbetet med systemkonstruktion pågår och målsättningen är att utföra ett fullskaleförsök vid Äspölaboratoriet i slutet av 2011.

Vald referensutförning för återfyllningen med förkompakterade block av svällande lera medför att återfyllningen närmast pluggen kan behöva anpassas för att inte svälltrycket mot pluggen ska bli allt för högt. Vidare måste betongen utföras med låg-pH-cement. Detta tillsammans med behovet av en mycket tät pluggkonstruktion medför att en del parametrar behöver verifieras i försök.

I konceptfasen utvärderades två konstruktionsalternativ; valvplugg och friktionsplugg. Bedömningen efter beräkningar /13-5, 13-6/ blev att valvpluggen tillsammans med bentonittätning och filter (figur 13-6) är en tätare konstruktion än friktionspluggen. För valvpluggen är beräkningarna baserade på data för framtaget betongrecept med låg-pH-cement /13-7/.



Figur 13-6. Sektion genom en plugg i en deponeringstunnel.



Figur 13-7. Gjuten plugg till inre sektionen i Prototypförvarstunneln vid Äspölaboratoriet.

SKB ser stora fördelar med att utföra betongpluggen utan armering. Fördelarna med en oarmerad konstruktion av låg-pH-betong relativt en armerad är:

- Inga risker för armeringskorrosion.
- Sprickrisker relaterade till armeringen med anledning av låg-pH-betongens krympning elimineras.
- Tidsvinster vid installation.
- Lägre kostnader.

Målet för den fortsatta utvecklingen är en färdig systemkonstruktion av pluggen. Det innebär följande:

- Vidareutveckla den konceptuella konstruktionen.
- Ta fram en kostnadssatt plan för industrialisering/implementering med kontrollmetoder som visar hur delsystemet kan implementeras och kontrolleras så att ställda krav uppfylls.
- Verifiera att konstruktionsförutsättningar och kravspecifikationer uppfylls.
- Utföra teknisk riskanalys som omfattar risker relaterade till både konstruktionen och planerna för industrialisering/implementering med kontrollmetoder.

Inom pågående projekt med systemkonstruktion av pluggen upprättas bygghandlingar för en oarmerad pluggkonstruktion av låg-pH-betong. Projektet omfattar även kylning och kontaktinjektering samt utförandebeskrivningar med kontrollprogram. Kylning och kontaktinjektering används för att få betongpluggen inspänd i berget, samt för att täta den potentiella läckagevägen mellan berg och betong. Planerad teknik för kylning och kontaktinjektering skiljer sig inte mycket från den som användes för prototypförvarets pluggar /13-8/.

Innan ett fullskaleförsök kan realiseras behövs följande insatser:

- Modellering samt tester av bentonittätning och filter för att säkerställa funktionen.
- Kraven på pluggens täthet behöver konkretiseras till flöde och geometri.
- Betongreceptet ska om möjligt anpassas till valvpluggens krav och förutsättningar. Vissa parametrar som krympning, draghållfasthet och krypning behöver studeras närmare.
- Kontrollmetod avseende täthet tas fram.
- Produktionsanpassning av berguttagsmetod för slitsar.

Därutöver krävs omfattande projektering för testuppställningen avseende tryckuppbyggnad och instrumentering samt utförande. I det längre perspektivet ska konstruktionen optimeras och produktionsanpassas. Hit hör att studera alternativa lösningar som uppfyller ställda krav men som är enklare att åstadkomma.

14 Teknikutveckling förslutning

Förslutning av förvaret omfattar återfyllning och förslutning av alla utrymmen utom de redan återfyllda deponeringstunnlarna, samt förslutning av undersökningsborrhål. Med undantag för vissa undersökningsborrhål kommer förslutningen inte att påbörjas förrän allt använt bränsle har deponerats. Konstruktion och genomförande är därför inte aktuellt förrän om mer än 50 år.

Forskning och utveckling som specifikt avser teknik för att försluta förvaret har ännu inte genomförts. Däremot har SKB under många år studerat och gjort omfattande forskningsinsatser, inklusive försök i full skala, för att återfylla och försluta deponeringstunnlar. SKB har också utvecklat och testat teknik för att försluta undersökningsborrhål. Erfarenheter och resultat från dessa insatser kommer att vara viktiga för kommande utveckling av tekniken för att försluta förvaret.

I sin granskning av Fud-program 2007 efterlyste SKI en redovisning av hur återfyllning av andra delar av förvaret än deponeringstunnlarna ska genomföras. SKI och SSI kommenterade även behovet av långtidsförsök vid Äspölaboratoriet samt teknikutveckling för pluggning av undersökningshål. Med hänvisning till nyvunnen kunskap om ”piping/erosion”, buffererosion och reaktion mellan cement och bentonit ansåg SKI att SKB behöver utreda om metoderna för pluggning av undersökningsborrhål med bentonit behöver uppdateras.

14.1 Krav och förutsättningar

Bergutrymmen

Förslutningen får inte försämra de övriga barriärernas funktion i någon betydande grad. Den ska också bibehålla sin barriärfunktion under lång tid i den miljö som kommer att råda i Kärnbränsleförvaret. Förslutningen i stamtunnlarna ska förhindra att återfyllningen i anslutande deponeringstunnlar förlorar sin barriärfunktion genom att den expanderar eller transporteras ut ur tunnlar. Genomgående gäller att förslutningen i ett bergutrymme inte får påverka förslutningen i ett intilliggande bergutrymme så att dess funktion äventyras. I de översta delarna av rampen och schakten ska förslutningen (toppförslutningen) utformas så att den avsevärt försvårar intrång i förvaret.

Enligt givna konstruktionsförutsättningar /14-1/ ska förslutningen hindra att det, mellan förvarsområdet och markytan, bildas strömningsvägar för vatten som kan äventyra bergets barriärfunktion. Detta krav bedöms vara uppfyllt om den hydrauliska konduktiviteten i alla utrymmen utom deponeringstunnlar, centralområde och de översta delarna av tillfarterna är mindre än 10^{-8} meter per sekund. Värdet avser ett genomsnitt för längre sträckor. Högre hydraulisk konduktivitet kan accepteras i sektioner där en tunnel eller rampen passerar zoner med förhöjd transmissivitet.

I de bergutrymmen där det finns begränsande krav för den hydrauliska konduktiviteten måste det valda materialets densitet vara tillräckligt hög för att förslutningen ska upprätthålla sin barriärfunktion. Det ska även vara möjligt att installera förslutningen i dessa utrymmen med tillräcklig densitet. För att uppnå detta måste det ställas krav på bergutrymmenas geometri och på acceptabelt vatteninflöde under installationen.

I likhet med övriga system och komponenter i slutförvaret ska förslutningen baseras på väl beprövad eller testad teknik. Vidare ska det vara möjligt att tillverka, installera och kontrollera förslutningen med hög tillförlitlighet.

Borrhål

Borrhål, borrade såväl från ytan som från utrymmen i förvaret, måste förslutas. Enligt givna konstruktionsförutsättningar /14-1/ ska förslutningen utföras så att hålen inte i onödan försämrar förvarets förmåga att hindra spridning av radionuklider. En preliminär bedömning är att detta kan uppnås om borrhålsförslutningen har en hydraulisk konduktivitet som är mindre än 10^{-8} meter per sekund. Högre hydraulisk konduktivitet accepteras i sektioner där borrhålet passerar zoner med förhöjd transmissivitet.

14.2 Nuläge och program

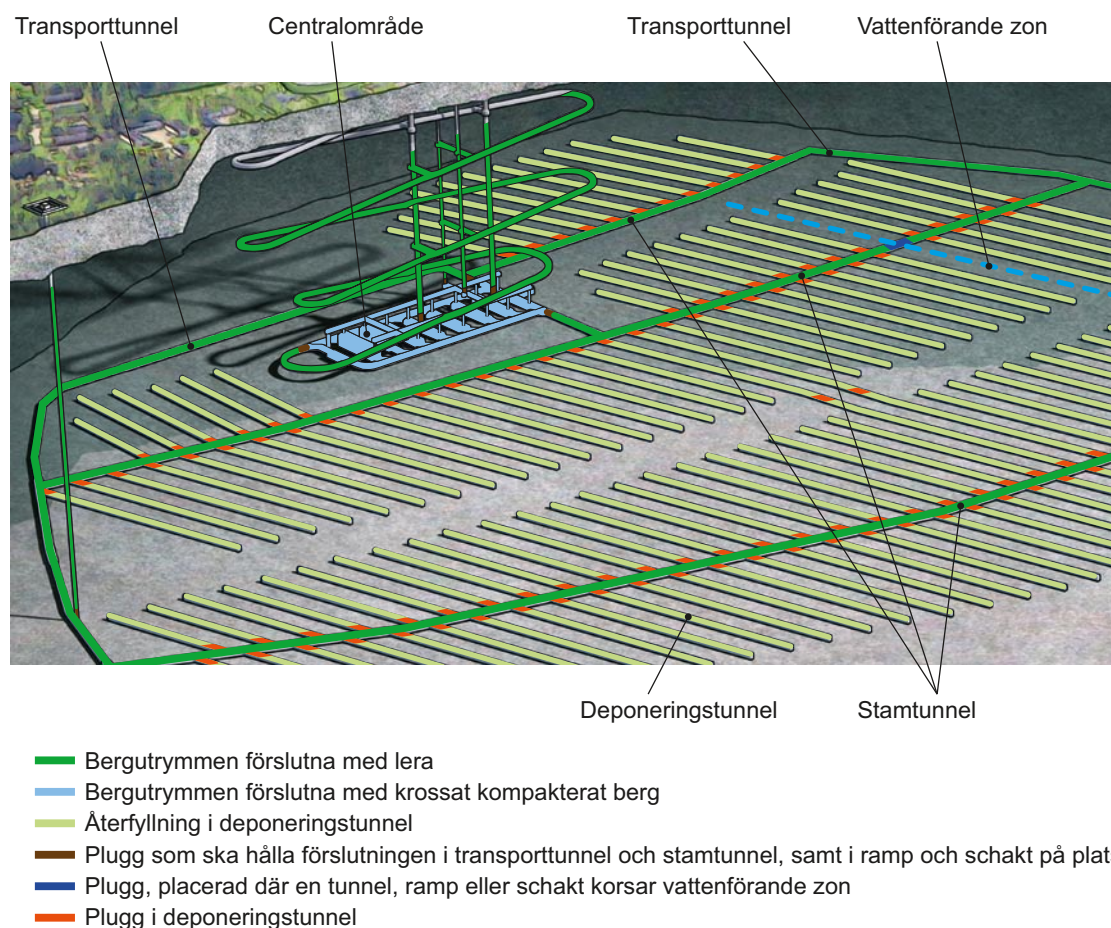
14.2.1 Referensutförning

Som underlag för säkerhetsanalysen SR-Site och baserat på angivna krav och konstruktionsförutsättningar har SKB fastlagt följande referensutförning för att försluta slutförvarets olika delar. Referensutförningen gäller till dess att resultat från forskning och utveckling med fokus på förslutning av förvaret gör det motiverat att ändra utförningen.

Stamtunnlar, transporttunnlar och centralområde

Figur 14-1 ger en principiell bild av den valda referensutförningen för förslutning av stam- och transporttunnlar samt centralområdet. För stam- och transporttunnlar är referensutförningen återfyllning med kompakterade block och pellets av svällande lera, enligt samma koncept som för återfyllning av deponeringstunnlar, se avsnitt 13.2.4. Referensutförning för förslutning av centralområdet är återfyllning med krossat berg som kompakteras.

Vid passage av vattenförande zoner kan det bli aktuellt att installera pluggar. Pluggar kan också behövas där olika förslutningsmaterial gränsar till varandra, bland annat där transporttunnlarna ansluter till centralområdet. I nuvarande skede av teknikutvecklingen gäller samma konceptuella referensutförning för pluggar för att försluta stam- och transporttunnlar som för pluggar i deponeringstunnlar.



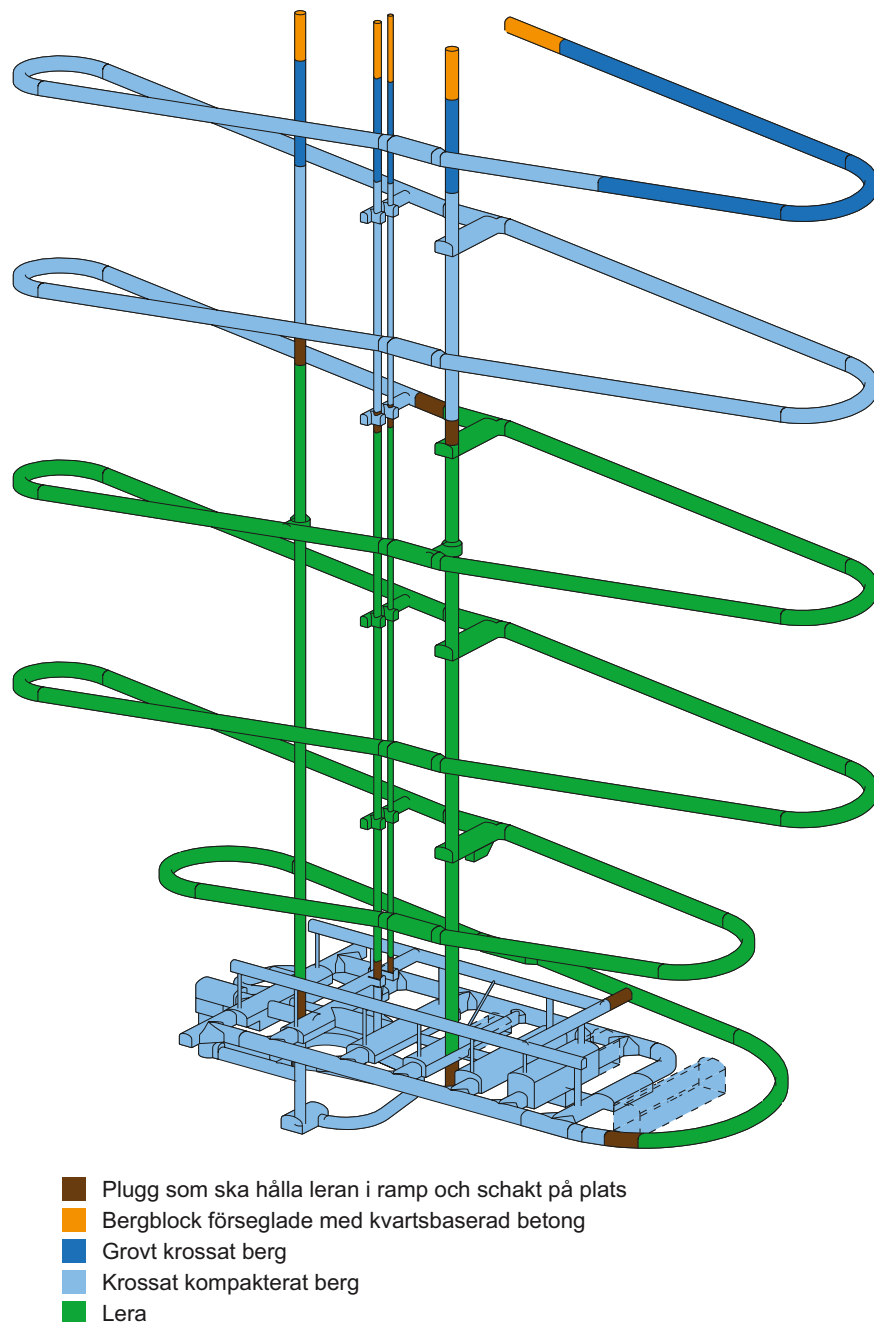
Figur 14-1. Principbild som visar referensutförning för förslutning av stam- och transporttunnlar samt centralområdet.

Ramp och schakt

Referensutförningen för förslutning av ramp och schakt, upp till toppförslutningen, är densamma som för stam- och transporttunnlar. Den valda referensutförningen för förslutning av ramp och schakt, inklusive toppförslutningen, illustreras i figur 14-2.

Toppförslutning

Referensutförning för förslutning av den övre delen av ramp och schakt (från nivån –200 meter och upp till –50 meter) är återfyllning med krossat berg som kompakteras. För att försvåra intrång i förvaret försluts de allra översta delarna (från cirka –50 meter och upp till markytan) med grövre bergmaterial.



Figur 14-2. Principbild som visar referensutförning för förslutning av ramp och schakt.

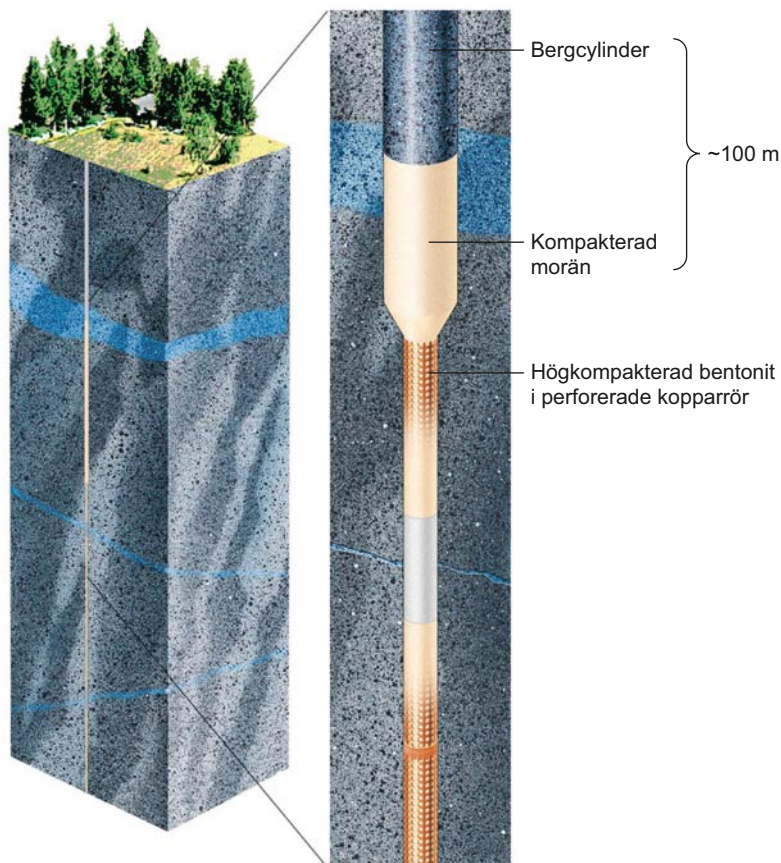
Undersökningsborrhål

Referensutförning för att försluta undersökningsborrhål är perforerade kopparrör fyllda med högkompakterad bentonit. I sektioner där borrhålet passerar vattenförande zoner kan leran erodera. Därför fylls dessa passager med kvartsbaserad betong, som är permeabel och motståndskraftig mot erosion. Den översta delen av borrhålet försluts med ett material som motstår lerans svälltryck och som klarar mekaniska påfrestningar. Cylinderformade bergpluggar i kombination med platsgjutna betongpluggar och välkompakterad morän har valts för referensutförningen. Utformningen illustreras i figur 14-3.

14.2.2 Program

SKB planerar att under de kommande tre åren studera alternativa koncept för utförning av förslutningen. Avsikten är att arbetet ska ge underlag för systemkonstruktion av den eventuellt reviderade referensutförning som konceptstudierna leder fram till.

De planerade insatserna omfattar i huvudsak skrivbordsstudier; inga omfattande tester planeras. Resultat från arbetet med systemkonstruktion för återfyllningen och från arbetet med utveckling av pluggar för deponeringstunnlarna, se avsnitt 13.2.1 och 13.4, kommer att utgöra viktigt underlag för projektet. Delar av arbetet kan komma att utföras i samarbete med Posiva.



Figur 14-3. Referensutförning för förslutning av undersökningsborrhål.

Mer i detalj planeras följande aktiviteter:

- Preliminära förslag till platsanpassade lösningar för förslutning av förvaret i Forsmark tas fram. De förslag som studeras kommer att baseras på reviderade krav på förslutningen, inklusive pluggar; sådana kommer att läggas fast med ledning av resultat från SR-Site. De reviderade kraven gör det sannolikt motiverat att studera förslutningskoncept som är enklare än den referensutformning som redovisas i aktuell version av linjerapporten för förslutning. Enklare förslutningskoncept kan bland annat innebära val av annan materialsammansättning och geometrisk konfiguration. För att säkerställa att de alternativa förslutningskoncepten inte leder till sämre säkerhet än i SR-Site utförs känslighetsanalyser, främst hydrogeologiska simuleringar, av den långsiktiga säkerheten för ett förvar i Forsmark.
- Konstruktionskrav för berguttaget i ramp och schakt under toppförslutningen behöver fastställas, bland annat med hänsyn till eventuell förekomst av en sprängskadad zon med förhöjd hydraulisk konduktivitet runt tunnelperiferin. Detta kommer att ske i en särskild utredning. Syftet är att säkerställa att utformningen och produktionen av tillfarterna gör det möjligt att senare åstadkomma en ändamålsenlig förslutning. I den övre delen av ramp och schakt finns vattenförande strukturer i berget. För dessa delar av tillfarterna har det därför inte varit meningsfullt att ställa krav på att förslutningen ska ha låg konduktivitet.
- Studier av pluggar. I samband med förslutningen kommer det att behövas både temporära och permanenta pluggar för olika situationer och med olika krav. Studierna omfattar specifikation av konstruktions- och funktionskrav samt förslag till utformning av pluggar som motsvarar dessa krav. Utfört och pågående arbete med pluggen i deponeringstunneln utgör viktigt underlag för studierna.
- Den pågående etappen av projekt borrhålsförslutning avslutas och resultaten från hittills utfört arbete sammanfattas. Vidare kommer förslag till insatser inom områden där projektet identifierat behov av fördjupade insatser att presenteras. En fråga som noterades vid granskningen av Fud-program 2007 är hur eventuell förekomst av piping/erosion och oönskade reaktioner mellan cement och bentonit kan påverka pluggning av undersökningsborrhål. Eventuellt kan referensutformningen för förslutning av borrhål behöva ändras, exempelvis genom att tillämpa något av de övriga koncept för borrhålsförslutning som SKB studerat /14-2/.

15 Teknikutveckling berg

Berglinjen omfattar detaljundersökningar, projektering, byggande och underhåll av Kärnbränsleförvarets undermarksutrymmen. Utvecklingsarbetet spänner över ett brett fält och avser metoder för undersökningar, karakterisering och bergbyggande, inklusive tätnings- och förstärkningsåtgärder samt utveckling av specialutrustningar. Valet av Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret har stor betydelse för berglinjens program för teknikutveckling.

Verksamheten inom berglinjen utgår från kraven på förvarets bergutrymmen med avseende på långsiktig säkerhet, arbetarskydd och effektivitet. Kraven ska omsättas till specifikationer för utförandet av undersökningar, projektering och byggande. Den tekniska utvecklingen ska säkerställa att det finns lösningar som möter kraven. En parallell och lika viktig aktivitet är dokumentationen av utförd projektering och byggande. Detta omfattar dokumentation av platsförhållanden, hur anläggningen anpassats till platsen (relationshandlingar) samt hur anläggningens olika delar uppförts (kvalitetsdokumentation).

15.1 Krav och förutsättningar

Berget som omger slutförvarets bergutrymmen är en av förvarets barriärer. Det ska ge en stabil kemisk och mekanisk omgivning för kapslarna, bufferten och återfyllningen. Vidare ska berget ha förmåga att fördröja transporten av radionuklider, framför allt genom långsamma grundvattenrörelser. Bergutrymmena ska placeras och utformas så att bergets egenskaper på den valda platsen tas tillvara på bästa möjliga sätt /15-1/.

Bergutrymmena i sig kan orsaka förändringar i det omgivande berget, exempelvis ändrade grundvattenförhållanden, spänningsomlagringar och skador från sprängning. Detta kan påverka såväl förutsättningarna för de tekniska barriärerna som bergets egna barriäreenskaper.

I konstruktionsförutsättningarna för den långsiktiga säkerheten anges krav på anläggningens dimensionering, hur anläggningen ska anpassas till berggrundens egenskaper och hur uppförandet tillåts påverka det omgivande berget. I konstruktionsförutsättningarna ingår också krav från övriga barriärer samt krav relaterade till anläggningens funktion under dess drifttid.

För pågående och planerad teknikutveckling inom berglinjen är framför allt följande krav betydelsefulla:

Krav relaterade till bergets barriärfunktion

- Deponeringshålen ska placeras mer än 100 m från deformationszoner med en spårlängd vid markytan på mer än 3 km.
- Så långt det rimligen är möjligt ska deponeringshålen placeras så att det inte kan uppkomma skjuvrörelser som ger större påkänningar än vad kapseln är konstruerad för.
- Inom deponeringsområdet ska grundvattnet uppfylla de kriterier som anges i SR-Can /15-1/.
- Avståndet mellan deponeringshålen ska väljas så att det för angivna egenskaper hos bränsle, kapsel och buffert resulterar i en temperatur i bufferten som inte överstiger 100 °C.
- Den totala vattenvolym som strömmar in i ett deponeringshål, från det att bufferten exponeras för inströmmande vatten till dess att den är mättad, ska vara begränsad.
- Innan en kapsel placeras i ett deponeringshål måste den sammanhängande faktiska transmissiviteten, integrerad utefter hela längden av deponeringshålets vägg och medelvärdesbildad runt hålet, vara mindre än 10^{-10} m²/s.
- Sprängskador ska begränsas och får inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet, utefter en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och medelvärdesbildad över tunnelsulan, som är högre än 10^{-8} m²/s.

- Under toppförslutningen ska den integrerade effektiva sammanhängande hydrauliska konduktiviteten hos återfyllnaden i tunnlar, ramper och schakt och i den sprängskadade zon som omger dem vara mindre än 10^{-8} m/s.

Övriga krav

För att buffert och återfyllning ska kunna uppfylla sina barriärfunktioner finns krav på bland annat utformningen av deponeringshål respektive deponeringstunnlar samt högsta tillåtna inflöde av vatten. Vidare finns krav på maximala vatteninflöden för stam- och transporttunnlar samt ramp och schakt.

15.2 Nuläge och program

I Fud-program 2007 redogjorde SKB för utvecklingsplaner avseende undersökning och karakterisering, injektering, borrning och sprängning av bergutrymmen, bergförstärkning samt borrning av deponeringshål. I sin granskning av programmet framförde SKI bland annat att:

- SKB bör redovisa detaljplaner för att utforma och genomföra ett storskaligt mätförsök av den störda zonen runt en sprängd tunnel, under realistiska bergmekaniska och hydrogeologiska förhållanden.
- Val av referensmetod för uttag av deponeringstunnlar bör ske i samband med att ansökan för uppförande av slutförvaret lämnas in.
- Det finns behov av fortsatta insatser för undersökningar och mätningar i deponeringstunnlar och deponeringshål, men att även mätningar i pilothål för deponeringshålen bör beaktas.
- Planerade forskningsinsatser kring injektering på stora djup är angelägna, SKB bör även beakta möjligheterna till förflyttning eller nybildning av läckage.

Därutöver redovisade SKI synpunkter på SKB:s program för att specificera sammansättning på låg-pH-cement, metoder för berguttag samt bormaskin för deponeringshål.

Sedan Fud-program 2007 presenterades har SKB genomfört ett omfattande fullskaleförsök för att demonstrera teknik för tätning med injektering under realistiska förhållanden, se avsnitt 15.5.1 samt omfattande undersökningar avseende utbredning och egenskaper hos den störda zonen runt en sprängd tunnel, se avsnitt 15.5.2. SKB har även tagit fram ett ramprogram för detaljundersökningar. Programmet kommer att redovisas i samband med ansökan, och planerade utvecklingsinsatser summeras i avsnitt 15.4.

SKB kommer att redovisa och motivera referenslösningar för utformning och utförande av slutförvarets berganläggningar, inklusive val av uttagsmetod för deponeringstunnlar, i samband med kommande ansökningar. Enligt SKB:s uppfattning uppfyller referenslösningarna i allt väsentligt angivna konstruktionsförutsättningar och de är tekniskt möjliga att åstadkomma. Vissa frågor kräver dock fortsatt teknikutveckling. Vidare behöver teknik som demonstrerats i tester och försök vidareutvecklas för industriell tillämpning.

15.2.1 Programöversikt

De övergripande behov och mål som styr utvecklingsprogrammet för berglinjen redovisas i avsnitt 9.3.7. Programmets huvuduppgifter och mål kan sammanfattas enligt följande:

- Vidareutveckla metodiken för bergprojektering och tillämpningen av observationsmetoden, i första hand avseende strategier för detaljanpassning av deponeringsområden och samordning av detaljundersökningar och byggproduktion.
- Vidareutveckla metoder och utrustning för detaljundersökningar med tillhörande modellering, i ett första steg inför bygget av tillfarterna, och i ett andra steg inför utbyggnaden av deponeringsområden.
- Vidareutveckla produktionsmetoder anpassade till de krav som ställs för berguttag, stadga och täthet. Målet är i första hand att kunna ange utförandekrav i bygghandlingarna för tillfarterna.

- Säkerställa att godkända och tillräckligt beprövade konstruktionsmaterial är tillgängliga i tid för bygget av tillfarterna.
- Säkerställa att de specialmaskiner som behövs, bland annat tunneldrivningsaggregat med hög borrhålsprecision, injekteringsutrustningar samt maskiner för bergförstärkning med nätning, finns tillgängliga i tid.
- Utveckla bormaskin för deponeringshål, med målet att tekniken är klar och kan användas när första deponeringsområdet byggs.
- Utveckla kontrollplaner, inklusive format och rutiner för dokumentation och för relationshandlingar, så att dessa är utvärderade och fastställda när bergarbetena startar. Program för detta kommer att redovisas i samband med kommande ansökningar.

Tidsplanerna för berglinjens teknikutveckling skiljer sig delvis från övriga produktionslinjers, eftersom väsentliga delar av tekniken måste vara klara att tas i drift vid byggstarten. Det gäller undersökningar, projektering och byggande av tillfarterna till slutförvarsanläggningen, som inbegriper schakt och ramp. Återstående delar måste vara klara att tas i drift i takt med att utbyggnaden av centralområde och senare deponeringsområden på förvarsnivån startar.

Den fortsatta planeringen av slutförvarsanläggningen i Forsmark utgår från den platsanpassade utformning som tagits fram under platsundersökningsskedet, benämnd Layout D2 /15-2/. De oklarheter och osäkerheter som återstår för denna utformning måste hanteras under kommande projektering och uppförande. Metodiken för detta bygger på observationsmetoden, se avsnitt 15.3. Metodiken och den faktiska tillämpningen av observationsmetoden i Forsmark behöver dock utvecklas, speciellt vad avser strategier för detaljanpassning av deponeringsområden och samordning mellan detaljundersökningar och byggproduktion.

Metoder för undersökningar samt tolkning av resultat och modellering har utvecklats under lång tid. Tillämpningarna under typområdesundersökningarna, vid Äspölaboratoriet och under platsundersökningarna har gett SKB en bred kunskapsbas inför kommande detaljundersökningar. Avancerade och effektiva metoder för borrhålsundersökningar finns att tillgå, liksom rutiner för alla led från planering till rapportering av undersökningar. De krav som tillkommer under uppförandeskedet medför ändå behov av vidareutveckling av undersökningsmetoder och modelleringsstrategier. Planerna för detta beskrivs i avsnitt 15.4.

Platsundersökningarna har också gett kunskap och erfarenhet om kvalitetssäkring och dokumentation av undersökningsdata och resultat från modellering. Uppförandeskedet innebär dock större informationsmängder och krav på löpande information för projekterings- och byggverksamhetens behov. Information behöver också vara tillgänglig för säkerhetsbedömningar, samt för tillsynsmyndigheter och andra intressenter. Detta kräver vidareutveckling av bland annat verktyg för datahantering, modellering och visualisering. Planerat utvecklingsarbete redovisas i avsnitt 15.6.

Planerna för återstående utveckling av utförandemetoder, byggnadsmaterial och specialmaskiner, se avsnitt 15.5, påverkas i hög grad av valet av Forsmark. Platsens egenskaper redovisas i platsbeskrivningen /15-3/ och de kvarvarande osäkerheterna har summerats i en egen rapport /15-4/. Konsekvenserna av dessa osäkerheter för den föreslagna förvarslayouten har analyserats i /15-2/. Särskilt betydelsefullt för den fortsatta teknikutvecklingen är följande:

- I den övre delen av berggrunden finns lokalt starkt vattenförande sprickor som måste passeras av tillfarterna till förvaret. Strategier och metoder för att detektera och karaktärisera dessa strukturer är viktiga för att i tid kunna göra rätt tätningsåtgärder. På större djup är frekvensen av vattenförande sprickor mycket låg, men ställvis kan injektering ändå behövas. Status och planerat fortsatt utvecklingsarbete för injektering beskrivs i avsnitt 15.5.1.
- Bergspänningarna är förhållandevis höga. Därför är kunskap om bergspänningarnas magnituder och orienteringar på förvarsdjup särskilt viktig för att minimera risken för överbelastning av berget kring bergutrymmen. Mätningar av bergspänningarna samt löpande observationer av tecken på överbelastning, särskilt spänningsinducerad spjälkning, kommer att vara viktiga för detaljutformning av tunnlar orientering och tvärsnitt. Planerna för att få tillförlitlig kunskap om bergspänningssituationen beskrivs i avsnitt 15.4.

Det finns också utvecklingsbehov inom området utförandemetoder, material och maskiner som väsentligen är oberoende av bergegenskaperna på plats. Det gäller bergguttar (avsnitt 15.5.2), låg-pH-material (avsnitt 15.5.3) samt utrustning för att borra och färdigställa deponeringshål (avsnitt 15.5.4).

15.3 Metodik för bergprojektering

Nuläge

Redovisningen av projekteringen i skede D2 /15-2/ visar huvuddragen för den metodik som kommer att tillämpas för projektering och byggande så att kraven på långsiktig säkerhet och effektivitet uppnås. En övergripande förutsättning är att kunna platsanpassa anläggningen så att bergförhållandena nyttjas så väl som möjligt. En god kunskap om bergets egenskaper och hur de är fördelade är därför viktig. Även om vi redan i dag har bra kännedom om variationsbredden för bergegenskaperna i Forsmark vet vi inte exakta lägen för till exempel sprickor som kan föranleda att deponeringshål måste förkastas (se avsnitt 15.4) eller för områden där berget har lägre värmeledningsförmåga. Först när dessa data finns tillgängliga, det vill säga när undersökningar under jord utförts, kan förvarets slutliga utformning, inklusive exakta kapselpositioner, fastläggas. För att ändå få en kontrollerad projekteringsprocess kommer principer baserade på observationsmetoden att användas.

Observationsmetoden är en projekteringsmetod som tillämpas vid undermarksbyggande när det kan vara svårt att i förväg förutsäga alla parametrar som kan påverka projektet. Angreppssättet beskrevs första gången i slutet av 1960-talet /15-5/. För aktuell konstruktion ska möjligt och acceptabelt beteende fastställas. Med beteende avsågs ursprungligen stadga och stabilitet för konstruktionen. För slutförvaret har begreppet vidgats till att även omfatta anpassning till konstruktionsförutsättningarna inklusive krav med hänsyn till långsiktig säkerhet samt utförandekrav som relaterar till andra barriärer, till exempel maximalt tillåtet inläckage för att installera återfyllningen.

För Kärnbränsleförvaret representeras dagens kunskapsnivå av resultaten från platsundersökningen, samt analyser av förutsättningarna att bygga anläggningen /15-2/ inklusive bedömning av konsekvenser för långsiktig säkerhet och miljöpåverkan. För att säkerställa konstruktionens acceptabla beteende föreskriver observationsmetoden ett uppföljningsprogram, samt en åtgärdsplan för det fall att konstruktionen inte uppför sig inom ramarna för vad som kan accepteras. För förvarets stadga, stabilitet och täthet kan observationsmetoden sannolikt tillämpas som avsett enligt /15-6/. Det behövs dock vidareutveckling så att SKB:s speciella behov av att i detalj anpassa layouten till kraven på ett effektivt och rationellt utnyttjande av de goda bergförhållandena i Forsmark tillgodoses. För att uppnå detta behöver det specificeras hur detaljerade undersökningar ska genomföras och tolkas.

Program

SKB avser att vidareutveckla den projekteringsmetodik som tillämpades för att ta fram nuvarande preliminära utformning av slutförvarsanläggningen /15-7/. Vidare ska kraven anpassas till återkopplingen från SR-Site, och det fortsatta projekteringsarbetets omfattning specificeras så att resurser för att ta fram bygghandlingar för slutförvarets tillfarter kan upphandlas. Under detta projekteringsarbete utvecklas successivt de kravspecifikationer som ska gälla för bergarbetena, först för tillfarterna och centralområdet. Inför ansökan om provdrift ska samtliga rutiner för byggande och undersökningar vara så utvecklade att integration av successiva undersökningar och modellering ger det löpande underlaget för att styra bergarbetena i deponeringsområdet.

15.4 Verktyg för detaljundersökningar

Nuläge

I Fud-program 2007 redovisade SKB den utveckling av metoder och instrument som bedömdes nödvändig för att kunna genomföra geovetenskapliga undersökningar av berget under bygge och drift av slutförvarsanläggningen. SKB framhöll då att de omfattande insatserna under platsundersökningarna i Forsmark och Oskarshamn samt den övriga forsknings- och undersökningsverksamhet som bedrivits sedan mitten av 1970-talet gav tillgång till metoder, instrument och erfarenheter inför

de undersökningar som behövs i samband med att slutförvaret byggs. Samtidigt poängterade SKB att arbetssättet kommer att behöva vidareutvecklas för att möta de högre kraven på bland annat snabbhet och effektivitet vid bygge och drift. Vissa instrument och metoder behöver förbättras och anpassas för undersökningar under jord, och för något ändamål kan helt nya metoder behöva tillämpas.

SKB har tagit fram ett ramprogram för de geovetenskapliga och ytekologiska undersökningar som krävs i anslutning till uppförande och drift av slutförvaret. Dessa så kallade detaljundersökningar ska ge underlag för den slutliga anpassningen till rådande bergförhållanden. Ramprogrammet (detaljundersökningsprogrammet) kommer att redovisas i samband med att ansökningarna lämnas in. Under åren fram till byggstart ska programmet vidareutvecklas och detaljeras, bland annat med hänsyn till resultat från SR-Site och granskningen av denna. Figur 15-1 ger en översiktlig bild av processen för det kompletta programmets framväxt och vilka underlag som kommer att vara viktiga.

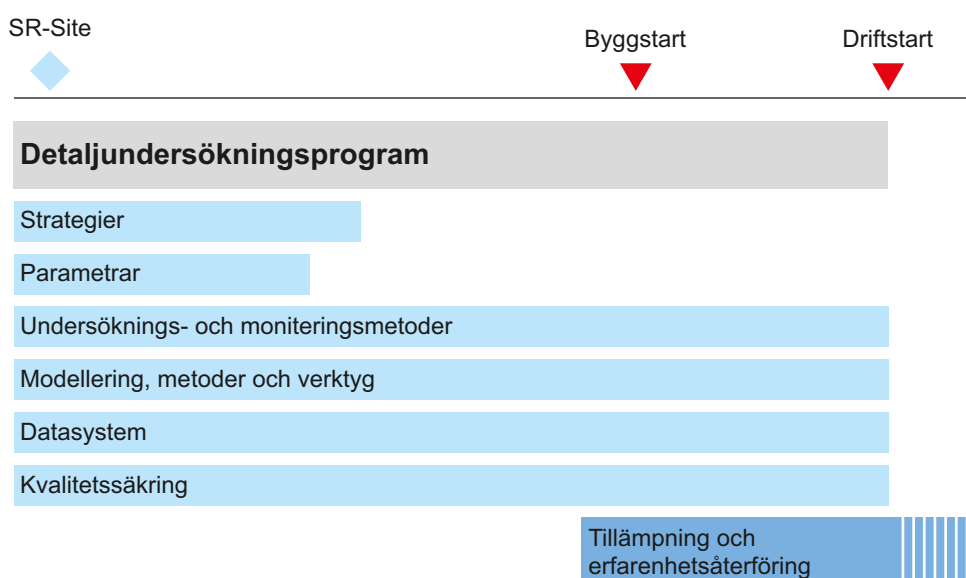
Detaljundersökningsprogrammet omfattar även planer för fortsatt utveckling av metoder och verktyg för undersökningar, modellering, datahantering och kvalitetssäkring. Detta är prioriterade uppgifter för SKB, eftersom väl fungerande undersökningsteknik och effektiva modelleringsverktyg är avgörande framgångsfaktorer för att kunna utföra projektering och byggande på det sätt som avses.

Program

Här redovisas de områden där det krävs större utvecklingsinsatser eller där utveckling är särskilt viktigt med hänsyn till behovet av information för att kunna bedöma den långsiktiga säkerheten.

Figur 15-2 visar en översiktlig tidsplan för den utveckling av instrument och metoder för undersökningar som SKB bedömer vara särskilt viktig. För vissa metoder och instrument bör utvecklingsarbete och tester vara genomförda innan bergarbetena påbörjas. Andra behöver inte vara färdigutvecklade förrän tunneldrivning inom förvarsområdet inleds. Det är viktigt att metoderna är väl utprovade och funktionstestade innan de börjar användas, särskilt de metoder som ska användas i deponeringstunnlar och deponeringshål.

Kunskaper och erfarenheter från undersökningar i samband med andra undermarksprojekt kommer att studeras som en del av förberedelserna inför byggstart. Posivas pågående tunneldrivning för ett slutförvar i Olkiluoto i Finland är särskilt intressant, eftersom de frågor som relaterar till den långsiktiga säkerheten där är desamma som för SKB:s slutförvarsprojekt. SKB och Posiva planerar också att samverka kring utvecklingen av instrument och metoder inom ett antal områden. Även pågående tunnelarbeten i Stockholmsområdet liksom undermarksprojekt i andra delar av Sverige och i omvärlden kan erbjuda viktiga erfarenheter.



Figur 15-1. Översiktlig tidsplan för utveckling av detaljundersökningsprogrammet fram till uppförande och drift.



Figur 15-2. Översiktlig tidsplan för utveckling av metoder och instrument för undersökningar som SKB bedömer vara särskilt viktiga.

Geodesi

Tillgängliga metoder för krökningsmätning av borrhål är alltså behäftade med betydande osäkerheter. Branschutvecklingen inom detta område kommer att följas och egen teknikutveckling av utrustning för krökningsmätning av borrhål kan inte uteslutas.

Installationen av buffert i deponeringshålet ställer krav på hålets raket samt tillåtna avvikelser från lodlinjen och avsedd geometri i övrigt. SKB planerar att utveckla instrument och metoder för kontroll av dessa krav. Tekniken ska vara färdigutvecklad och testad i god tid innan start av bygget av deponeringsområdet.

I Sverige pågår för närvarande byte av nationella koordinatsystem. Systemet för planangivelser, RT 90, ska ersättas med SWEREF 99, medan systemet för höjdangivelser, RHB 70, ska ersättas med RH 2000. SKB planerar att innan bygget av slutförvaret påbörjas växla över till de nya systemen.

Att transformera alla data från platsundersökningarna som refererar till äldre koordinatsystem kommer att kräva betydande arbetsinsatser.

Geologi och geofysik

Den geologiska dokumentationen av slutförvarets bergutrymmen kommer att kräva ett tunnelkarteringssystem som uppfyller högt ställda krav på resultatkvalitet, robusthet och användarvänlighet. Anpassning av ett system baserat på fotogrammetri med användning av digitalfoto för bergkartering av tunnlar har påbörjats. Utvecklingsarbetet, inklusive tester vid Äspölaboratoriet, planeras vara färdigt i god tid före byggstart.

Identifiering och karakterisering av så kallade "långa sprickor" (enskilda sprickor eller mindre deformationszoner), är en prioriterad uppgift för detaljundersökningarna eftersom sådana sprickor kan diskvalificera kapselpositioner. Enligt konstruktionsförutsättningarna (kopplat till det så kallade EFPC-kriteriet /15-1, 15-8/) måste ett deponeringshål som skärs av en "lång spricka" som kan följas runt hela tunnelns periferi förkastas. Dessutom gäller att om en spricka korsar fem eller fler deponeringshål ska dessa förkastas.

Utöver de geologiska karteringsmetoderna för tunnlar och borrhål måste sannolikt en kombination av geofysiska och hydrauliska metoder tillämpas för att identifiera och karakterisera långa sprickor. Basmetoderna är etablerade, men viss uppgradering krävs och metodik för samtolkning av mätdata och modellering behöver utarbetas. Detta arbete har inletts och drivs delvis i samarbete med Posiva. Slutresultatet ska tillämpas först när första deponeringsområdet byggs, men eftersom frågan har stor betydelse kan tekniken behöva testas och trimmas in under flera år innan den tas i anspråk för rutinmässig användning.

I slutförvaret ska cirka 6 000 deponeringshål borraras, undersökas och godkännas. Detta kommer bland annat att kräva väl utvecklad teknik för kartering av borrhålsväggen yta. En anpassning och vidareutveckling av tekniken för bergkartering i tunnlar planeras för tillämpning i deponeringshål. Nedskalningen från tunnel till deponeringshål kräver betydande utvecklingsinsatser för att den fotogrammetriska tekniken ska kunna tillämpas. Karteringstekniken ska tas i bruk när första deponeringsområdet byggs. Tester och intrimning både i Onkalo och vid Äspölaboratoriet förutses som en del av implementeringsfasen.

Bergmekanik

En av de viktigaste kvarstående osäkerheterna i platsmodellen för Forsmark gäller det mekaniska spänningstillståndet, i första hand huvudspänningarnas magnituder. I planeringsarbetet inför fortsatta undersökningar ingår att identifiera de metodkombinationer som har störst potential att minska dessa osäkerheter.

Borrhålmätningar med överborrning samt hydrauliska metoder kommer att vara mindre resurskrävande att göra under byggskedet än under platsundersökningarna, eftersom de kommer att kunna göras i korta hål borrade från tunnlar. Då schakt och tunnlar börjar drivas kommer konvergenzmätningar att tillämpas som ett beprövat alternativ och komplement till borrhålmätningar. Som förberedelse för konvergenzmätningarna studeras de mätningar och analyser som Posiva gör i Onkalo.

Två andra metoder, SLITS (SLim borehole Thermal Spalling) och LSG-LVDT (Long Strain Gauges-Linear Variable Differential Transformer), befinner sig under utveckling. Utvecklingsarbetet bedrivs i samarbete mellan SKB och Posiva. Vid lyckat utfall kan båda metoderna komma att användas. SLITS-metoden baseras på det faktum att uppvärmning av en bergvolym kring ett belastat borrhål kan ge en tillkommande belastning som leder till spjälkning. Metoden har eventuellt potential att bli ett robust sätt att löpande fastställa största huvudspänningens orientering. LSG-LVDT-konceptet är en överborrningsmetod där mätning utförs i en större skala (grövre borrhål) än vid gängse överborrningsmätningar. SKB planerar att kalibrera metoden mot kända förhållanden i Äspölaboratoriet och avser också att i samarbete med Posiva integrera LVDT-mätning med SLITS-metoden i hål borrade från tunnlar.

Termiska egenskaper

Det finns behov av att vidareutveckla fältmetoder för karakterisering av berggrundens värmeledningsförmåga som är mer rationella och mindre kostnadskrävande än dagens. SKB har övervägt några alternativa utvecklingsvarianter för att bestämma bergarternas värmeledningsförmåga, in situ och i en skala som är relevant för kapseln. Utvecklingsbehovet är i dagsläget svårbedömt. SKB deltar i en arbetsgrupp under ISRM (International Society of Rock Mechanics) som ska ta fram förslag till metodik för bestämning av termiska egenskaper.

Hydrogeologi

SKB förfogar över ett flertal hydrogeologiska metoder för tillämpning både ovan och under jord. En prioriterad uppgift i planeringen av detaljundersökningarna är att välja ut de undersökningsmetoder som ska användas under jord. Berggrunden i Forsmark kännetecknas av hög vattenföring nära ytan, medan mycket låg konduktivitet dominerar på förvarsdjup. Dessa ytterligheter kan ställa särskilda krav på mätmetoderna. De mätningar som ska göras avser karakterisering och monitorering i borrhål, samt dokumentation av inläckage till tunnlar och deponeringshål. Två kriterier är avgörande. Dels ska de hydrauliska testerna uppfylla högt ställda krav på mätnoggrannhet, dels ska en rationell logistik och smidig anpassning till andra aktiviteter i samband med byggande och drift uppnås.

SKB planerar att använda en kombination av utflödestester, injektionstester, flödesloggning och interferenstester. Förstudier kommer att initieras för att fastlägga de testmetoder och metodkombinationer som ter sig optimala med hänsyn till kvalitet och undersökningslogistik. Kravspecifikationer för utrustningar kommer att upprättas och utvärderingsmetodik fastläggas. Därefter vidtar teknisk utveckling, där så bedöms nödvändigt.

Speciella utvecklingsinsatser planeras för metoder att mäta de små inflöden som förväntas till pilothål för deponeringshål och färdigborrade deponeringshål. Även utveckling av metoder för att mäta små inläckage i tunnlar planeras. Dessa arbeten kommer delvis att bedrivas i samarbete med Posiva.

Hydrogeokemi

De flesta hydrogeokemiska fält- och laboriemetoder som SKB förfogar över uppfyller kraven på kvalitet och praktisk funktionalitet. Mer omfattande utvecklingsbehov har dock identifierats på ett par punkter. Den ena är fullständig kemikarakterisering med mobil mätcell, under jord och med on-line mätning av Eh, pH, EC, O₂ och vattentemperatur. Den andra är bestämning av kolloidhalt med så kallad single particle counting.

Ett första försök med ett portabelt instrument, som skulle kunna användas för pH- och Eh-mätningar vid Äspölaboratoriet, gjordes i Prototypförvaret. Alla instrument har hittills utrustats med speciellt anpassad elektronik, eftersom kommersiella instrument har visat sig ha problem i tunnelmiljö, även om de fungerar bra i laboriemiljö.

Transportegenskaper

Ämnesområdet omfattar både fält- och laboriemetoder. Endast smärre utvecklingsbehov har identifierats. Vidareutveckling planeras av en förenklad tillämpning av långtidsförsök i enskilda borrhål för bestämning av diffusionsegenskaper (LTDE-SD), se även avsnitt 25.2.13. Utveckling planeras också av en ny laboriemetod för bestämning av sorptionskoefficienter, matrisdiffusivitet och matrisporositet baserad på elektronmigration, som komplement till genomdiffusionsmätning. Dessutom är en ny variant av laboriebästmning av inre ytor i berget (så kallad BET-yta) för hela borrhärnebitar under utveckling, vilken kan bli ny standardmetod, se även avsnitt 25.2.15.

Monitorering

Då underjordsutrymmen blir tillgängliga kommer monitoreringen att utvidgas till att även omfatta inflödet av grundvatten till olika tunnelavsnitt. För detta används traditionell teknik, men vissa förbättringar förutses. Som förberedelse kommer erfarenheter från fintättningsprojektet vid Äspölaboratoriet /15-9/ samt resultat från pågående BeFo-projekt att studeras och utvärderas.

SKB har påbörjat en utredning av förutsättningarna för att installera ett lokalt seismiskt nätverk i Forsmark. Syftet är att i anslutning till bygget av slutförvaret kontinuerligt registrera naturlig eller inducerad seismisk aktivitet med avsevärt lägre magnituder än vad som kan registreras i det nationella seismiska nätet. Såväl naturliga jordskalv som salvsprängningar kommer att kunna registreras. Förutom att en databas över jordskalv byggs upp kan mätdata analyseras med avseende på parametrar som bidrar till förståelse av bergets respons på tunneldrivning. Om utredningen visar att det är motiverat att installera ett lokalt seismiskt nätverk är målsättningen att ett sådant ska vara i drift innan tunnelarbetena börjar.

Undersökningsborrning

Teknik för undersökningsborrning som uppfyller detaljundersökningarnas behov bedöms på det hela taget finnas tillgänglig. Begränsade utredningar och utvecklingsarbeten ska dock initieras. SKB:s höga krav på pilotborrhålens raket kräver metodutveckling. Ett första steg blir att göra en noggrann genomgång av befintliga metoder för styrning av borrhål som underlag för eventuell metodutveckling.

Ett antal borrhånsrelaterade parametrar ska registreras samtidigt som borrhånsutförs, så kallade MWD-mätningar (Measurement While Drilling). I ett pågående projekt undersöks om de verktyg som finns för analys av MWD-data kan ge bättre prognoser för bergegenskaperna än som hittills varit möjligt. I projektet studeras även senaste utvecklingen på hårdvarusidan.

Modellering

Planerade utvecklingsinsatser för modellering berör metodik för att uppfylla väsentliga konstruktionsförutsättningar, eller kopplar till utnyttjande av nya typer av underjordsdata. En väsentlig komponent är modellering av långa sprickor i samband med tillämpning av EFPC-kriteriet och kriterier avseende sprickors hydrauliska egenskaper vid utvärdering av deponeringspositioner. En översyn behövs också av metodiken för avbildning av objekt från karterade tunnelytor till tredimensionell representation i aktuella modeller. Vidare kommer metodiken att ses över för tolkning av hydrauliska egenskaper hos flödande strukturer utifrån mätningar i tunnlar, pilot- och sonderingsborrhål, med nödvändiga hänsyn till observationsskala, tvåfasflöde och så kallade skineffekter. Övrig utveckling av metodik och verktyg för modellering, som även är betydelsefulla för detaljundersökningarna, behandlas i avsnitt 25.3.

15.5 Utförandemetoder, byggnadsmaterial och specialmaskiner

15.5.1 Injektering

Nuläge

Berglinjens mest omfattande utvecklingsprojekt sedan Fud-program 2007 är fintättningsprojektet. Projektet innebar att en 80 meter lång tunnel, benämnd TASS-tunneln, byggdes i Äspölaboratoriet på 450 meters djup /15-9/. Huvudsyftet var att visa att berget på detta djup kan tätas så att kravet på begränsat inflöde till återfyllningen kan uppfyllas.

Innan injekteringen gjordes och tunneln sprängdes ut karakteriserades berget längs tunnelsträckningen med hjälp av tre kärnborrhål. Baserat på inläckaget till borrhålen prognostiserades inläckaget till tunneln (utan tätning) till 30–120 liter per minut och 60 meter tunnel. Den täthet som uppnåddes, huvudsakligen med förinjektering, motsvarade ett inläckage på 1 liter per minut och 60 meter tunnel. Den efterinjektering som gjordes bekräftade tidigare erfarenheter att efterinjektering under höga vattentryck är komplicerat.

Som bas för att välja skärmgeometrier och pumptryck gjordes prognoser för sprickfördelningen och den minsta spricka som måste tätas, och inträngningslängder beräknades /15-10/. Tätningen gjordes med såväl gängse injekteringsskärmar utanför tunnelkonturen, som med en ny geometri där injekteringshålerna hölls innanför tunnelkonturen. Även den alternativa borrhålsgeometrin gav tillfredsställande tättningsresultat. Två olika injekteringsmaterial användes; ett av SKB och Posiva framtaget cementbaserat bruk i kombination med Silica sol. Projektet har också gett värdefulla

kunskaper om hur injekteringsmaterialens egenskaper påverkar injekteringsprocessen och dess resultat. Detta ger förutsättningar för att styra materialegenskaper och genomförande för att uppnå erforderlig täthet med kontrollerad spridning av injekteringsmaterial.

Byggandet av fintätningstunneln har genererat en mängd data, som tillsammans med data från den tidigare byggda TASQ-tunneln /15-11/ ger goda möjligheter att pröva olika modeller för inflöde och tätning i syfte att förstå och kunna prognostisera dessa processer.

Program

SKB:s utvecklingsarbete för att uppfylla kraven på begränsat inflöde till slutförvarsanläggningen syftar till att först nå grundläggande förståelse för de mekanismer som påverkar möjligheterna att åstadkomma tillräckligt täta bergutrymmen med acceptabla material. Förståelsen ska sedan omsättas i dels metoder för undersökning och konstruktion, dels utveckling av utrustning och material. För att i praktiken ha kontroll på arbetena, uppnå erforderliga resultat i fält och göra detta rimligt effektivt, krävs även att kommunikation, styrning och handhavande fungerar och trimmas.

Den injekteringsteknik som SKB behöver ska 1) uppfylla de krav som är relaterade till långsiktig säkerhet 2) klara de specifika tätningsscenarioer som är betingade av platsens hydrogeologiska förutsättningar, samt 3) möta kraven på kvalitetssäkrat och effektivt genomförande.

KBS-3-metoden ställer inga särskilda krav på tätningens beständighet på lång sikt. Tätning med injektering görs med syfte att temporärt begränsa inflödet av vatten så att buffert och återfyllning kan installeras utan att eroderas. Som framgår av avsnitt 15.1 ställs det krav på mycket låga inflöden i deponeringshål och deponeringstunnlar. Vidare finns restriktioner för vilken påverkan som berget runt tunnlar får utsättas för, till exempel återhållsamhet vad gäller att skapa nya kanaler för vattenflöde och att införa främmande material i bergmassan.

Kontroll av täthet och inläckage är väsentligt för resultatuppföljning av injekteringen, ur miljöövervakningssynpunkt och för förståelsen av bergets hydrauliska respons på byggverksamheten. Kontrollen av täthet och inläckage kommer att utgöra en integrerad del av byggkontrollen, men teknik och rutiner behöver vidareutvecklas.

Platsundersökningen i Forsmark har visat att bergmassan på förvarsdjup har få vattenförande sprickor. De inflöden som prognostiseras under det mer vattenförande ytliga berget (utan injektering) är följaktligen låga, varför systematisk förinjektering inte bedöms behövas /15-2/. Den primära uppgiften på förvarsnivå blir då att i projekteringsarbetet identifiera de avsnitt längs planerade deponeringstunnlar som skärs av vattenförande sprickor där selektiv injektering kan behövas. Utvecklingsarbetet för injektering inom deponeringsområdet syftar därför i första hand till att lösa ett prognostiseringsproblem – att kunna förutsäga när injektering behövs utifrån undersökningar i pilot- och sonderingshål – och bedrivs i huvudsak som en del av detaljundersökningsprogrammet.

Användning av Silica sol är nytt inom berginjektering. Det finns därför skäl att aktivt inhämta nya kunskaper och erfarenheter från studier och tillämpningar i andra projekt. De resultat som hittills erhållits behöver omsättas till teknik för rutinmässig, industriell produktion. Väntetiden efter injektering, innan borrning och sprängning för nästa salva kan börja, är generellt en viktig fråga. Reducerad väntetid ger stora fördelar för produktivitet och ekonomi vid tunneldrivning. För Kärnbränsleförvaret kan detta ha betydelse främst vid drivningen av tillfarterna genom den mer vattenförande, ytligare delen av berggrunden. SKB:s avsikt är att driva fortsatt utveckling inom detta område i samverkan med bergbyggnadsbranschen i övrigt.

15.5.2 Bergguttag

Nuläge

SKB har valt konventionell borrning/sprängning som metod för bergguttag för slutförvarsanläggningen. De väsentligaste fördelarna med borrning/sprängning är hög flexibilitet, mogen teknik och jämförelsevis låg kostnad, inte bara för själva bergguttaget utan också för efterföljande arbeten /15-12/. Metoden kan lätt justeras för olika bergförhållanden, genom att tunnelform och sprängdesign anpassas till rådande krav och platsförhållanden. Närmare motiv till val av metod och jämförande utredning om olika bergguttagsmetoder kommer att redovisas i ansökan.

I samband med berguttaget för fintätningstunneln på Äspö (se avsnitt 15.5.1) utvärderades vilken konturhållning som kan uppnås med modern borrhutrustning och kunskap om vilka faktorer som påverkar utbredningen av sprängskador i tunnelkonturen /15-13/. Eftersom projektets primära mål var att få en tät tunnel fanns god tid att utvärdera resultat från en berguttagsetapp till nästa (cirka 20 meter tunneldrivning) och vidta korrigerande åtgärder. Den sprängningsteknik som tillämpades baserades på forskningsresultat om hur sprängskador kan beräknas /15-13/, samt resultat från tidigare sprängning på Äspö /15-14, 15-15/. Resultaten visade att de toleranskrav som återfyllningen ställer på tunnelkonturen kunde innehållas med marginal, se figur 15-3 /15-16/.

För att studera sprängskadorna i fintätningstunneln gjordes dels mätningar på tunnelväggen med radarteknik, dels omfattande undersökningar av block som togs ut från väggen.

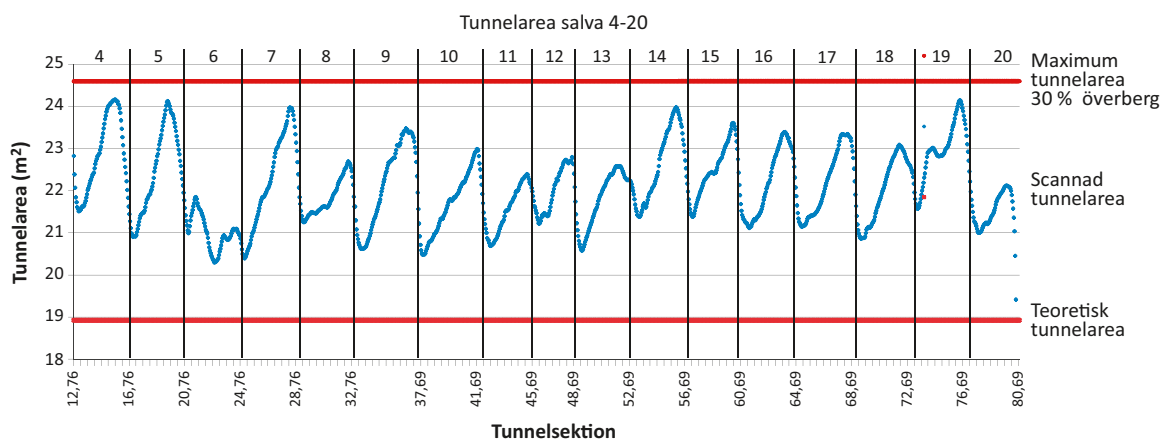
Radarmätningarna utfördes med högfrekvent markradar (Ground Penetrating Radar, GPR) /15-17/ i ett rutnät med 0,5×0,5 meters punktavstånd på tunnelväggen. Resultaten illustreras i figur 15-4. Figuren visar det avstånd, in i berget från tunnelkonturen, där en förhöjd dispersivitet uppmätts (dispersionszonen). Dispersiviteten representerar frekvensberoendet hos radarvågornas hastighet och amplitud, och påverkas av bergets mekaniska egenskaper. En ökad förekomst av sprickor ger förhöjd dispersivitet. Variationen i dispersivitet kan således spegla den relativa sprickfrekvensen i tunnelväggen och dispersionszonens djup ger en uppfattning om till vilket djup sprickfrekvensen är förhöjd.

Figur 15-4 indikerar att områden med större djup på dispersionszonen överlag sammanfaller väl med lägena för de inre delarna av salvorna, där det lokalt krävs högre laddningskoncentration för att initiera detonation i borrhålen. Dokumenterade naturliga sprickor bidrar delvis till det parti med djupare dispersionszon som syns i mitten av figuren.

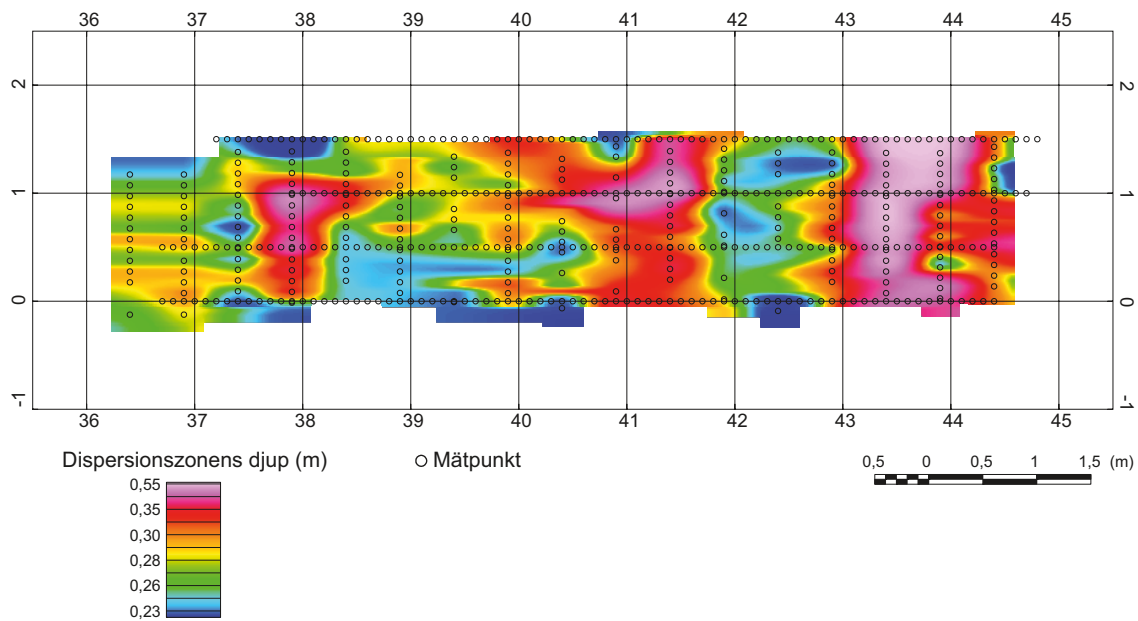
För att studera sprängskadeeffekten mera ingående sågades åtta block ut från ett åtta meter långt avsnitt i tunnelväggen. Blocken var en meter långa, 1,5 meter höga och cirka 0,8 meter djupa. Varje block sågades i skivor, cirka tio centimeter tjocka. Skivorna detaljstuderades med avseende på naturliga och sprängningsinducerade sprickor.

En tredimensionell modell över sprickornas utbredning skapades /15-18/, se figur 15-5. De flesta spränginducerade sprickorna var för korta för att kunna modelleras mellan två skivor. Modellen visade att sprängskadesprickorna var begränsade till den inre delen av salvan, jämför även figur 15-4. I större delen av modellen är sprängskadorna begränsade till korta sprickor, sub-parallellt med konturen.

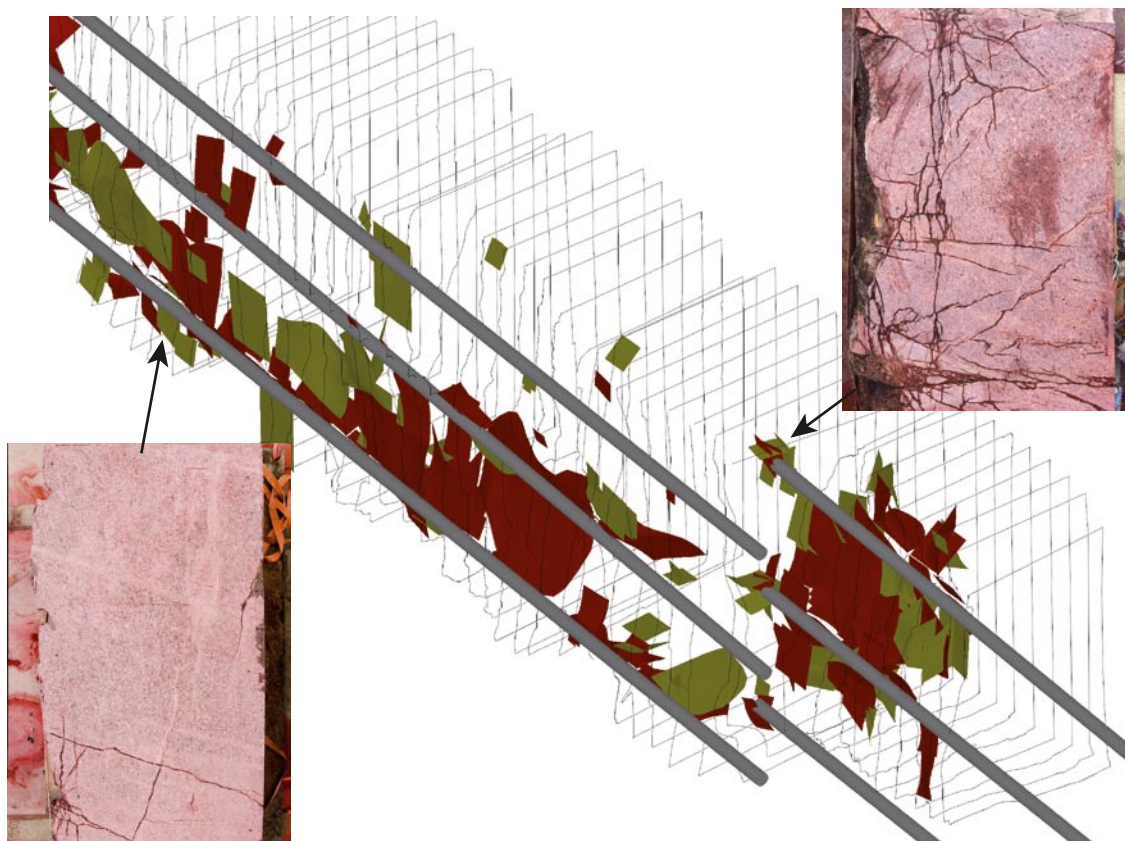
Prover över olika sprickor togs ut och transmissiviteten undersöktes i laboratorium. Undersökningen utfördes med hjälp av en permeameter, vilket möjliggjorde ett isostatiskt tryck för att simulera spänningstillståndet in-situ. Utrustningen hade en detektionsgräns för transmissivitet på cirka 10^{-9} m²/s.



Figur 15-3. Inmätt tvärsnittsarea för fintätningstunneln, från och med fjärde salvan då sprängningen genomfördes med full area. De röda linjerna markerar önskat utrymme i en deponeringstunnel, respektive största tillåtna tvärsnittsarea.



Figur 15-4. Djupet på dispersionszonen (zon med förhöjd dispersivitet) enligt radarmätningar över tunnelväggen i fintätningstunneln vid Äspölaboratoriet. Dispersionszonen tolkas som ett mått på det djup till vilket sprickfrekvensen är förhöjd /15-17/.



Figur 15-5. Utsnitt från sprickmodellen från fintätningstunneln. Modellen täcker tre borrhål i konturen, och går över tre salvor. Fotot uppe till höger är från slutet av en salva där laddningskoncentrationen är relativt hög. De gröna och rödbruna sprickplanen i modellen visar utbredningen av sprängskadan. Fotot nere till vänster kommer från ett snitt mitt i en salva, och visar – förutom naturliga sprickor – några sprängskadesprickor sub-parallellt med tunnelväggen.

Det fanns inte många sprängsprickor att testa, men för ett antal av dem låg transmissiviteten under mätgränsen. Kompletterande injekteringstester i korta borrhål inom den förväntade skadezonen gjordes i anslutning till de platser där blocken tagits ut. I vissa hål var transmissiviteten lokalt under cirka 10^{-9} m²/s, men i andra upp till cirka 10^{-6} m²/s. Av större betydelse är dock att de inducerade sprickorna inte bildade ett kontinuerligt nätverk, varför kravet på en högsta transmissivitet över en längre tunnelsträcka (20–30 meter) kunde innehållas /15-19/.

I sammanfattning visar undersökningarna av fintätningstunneln att med den sprängteknik som användes och den kvalitetskontroll som tillämpades kunde kraven på tunnelns kontur innehållas – åtminstone i vägg. Detta gäller med avseende på både geometri och att inte orsaka någon kontinuerlig flödesväg längs tunnelns periferi. Dock användes enbart patronerade sprängämnen för att ha så bra laddningskontroll som möjligt. Försök att ladda med strängemulsion indikerade problem med att ha fullgod kontroll över laddningsfördelningen /15-20/.

Program

Erfarenheterna från de berguttagsförsök som gjorts är positiva med avseende på de krav som återfyllningen ställer på tunnelkonturen, samt kravet att inte skapa en kontinuerlig skadezon som orsakar flödesvägar längs tunneln. För att uppfylla dessa krav i löpande produktion krävs dock vidareutveckling. Det gäller tillämpning av kraven i projekteringen, avseende både platsanpassning av layouten och utförandekrav för de olika enhetsoperationerna. Även metoderna för att bestämma omfattningen av sprängskador kräver vidareutveckling.

Flera utvecklingsfrågor förutsätter samverkan med tillverkare och leverantörer. Utveckling av befintliga tekniker för att möta SKB:s projektspecifika krav kan till exempel omfatta:

- Förbättring av borrhåstrustningar när det gäller precisionen i borrhåningen mot avsedd slutpunkt.
- Anpassning av utrustningar för att få mer information vid on-line registrering (MWD) av borrhåparametrar.
- I samarbete med leverantörer ta fram kompetenskrav för operatörer av borrhåstrustning.
- Förbättring av teknik för laddning. Laddning med patronerat sprängämne kan göras med god kontroll på laddningskoncentrationen. Men emulsionssprängämne, som blandas vid tunnelfronten när det ska användas, har många fördelar med avseende på säkerhet och arbetsmiljö. Utrustningarna har dock inte tillräcklig precision för att styra laddningen mot de snäva toleranser som gäller för skonsam sprängning. Utveckling av bättre styr- och reglerutrustning för automatisk laddning är viktig för att laddningen ska kunna göras med tillräckligt god precision.
- Elektroniska tändare är nödvändiga för att få den momentana detonering av ett antal parallella hål som enligt /15-13/ fordras för att minimera sprängskadorna.

En samverkan med andra beställare av tunnelbyggnad, främst infrastrukturbyggande verk och Posiva, kan driva på teknikutvecklingen och öppna för att dela kostnader med andra intressenter. Även när det gäller krav på utförande och kontroll av konturhållning och skadezon söker SKB samverkan med andra aktörer.

15.5.3 Material med lågt pH

Under ett visst djup i Kärnbränsleförvaret får endast så kallade låg-pH-material användas. Detta krav påverkar val av injekteringsmedel och de material som kan användas vid bergförstärkning, i första hand sprutbetong. Injekteringsmedel behandlas i avsnitt 15.5.1. Nedan sammanfattas nuläge och program för material till bergförstärkning.

Nuläge

Inom ramen för EU-projektet ESDRED genomfördes under 2006 försök med låg-pH-sprutbetong för bergförstärkning vid Äspölaboratoriet. Den sprutbetong som användes saknade dock armering.

Under 2009 gjorde SKB nya försök med låg-pH-sprutbetong vid Äspölaboratoriet, dels i en försöksnisch (NASA 0408A) på 56 meters djup och dels i fintätningstunneln på 450 meters djup. Dessa fältförsök föregicks av laboratorietester hos CBI i Stockholm för att utveckla receptet för betongen. Därefter genomfördes material- och sprutningsförsök i pilotskala vid Vattenfalls betonglaboratorium i Älvkarleby. Denna gång ingick även inblandning av stålfibrer i sprutbetongen för armering, på det sätt som är gängse vid bergförstärkning med sprutbetong.

SKB har också installerat 20 stycken bergbultar med låg-pH-bruk i den nämnda försöksnischen. Bultarna kommer att följas upp under en tioårsperiod. Speciellt intressant att undersöka är beständigheten hos bruket och eventuell förhöjd korrosion av bultarna på grund av att de är ingjutna med ett bruk med pH på cirka 11, jämfört med vanligt bruk med pH på cirka 12,5.

Begränsade försök med att bestämma korrosion av stål i låg-pH-betong inleddes också under 2009 och uppföljningen av dessa försök kommer att pågå under cirka 10 år. SKB är också initiativtagare och sammanhållande för ett internationellt projekt som påbörjades 2008, med syfte att utarbeta en enhetlig metod för att mäta pH-värdet för cementprodukter. I projektet deltar förutom SKB även Posiva i Finland, Nagra i Schweiz, Enresa i Spanien samt Numo och JAEA i Japan. pH-mätningar enligt samma metod utförs också av CEA i Frankrike och RAWRA i Tjeckien.

Program

Programmet omfattar huvudsakligen uppföljning av Äspö-försöken med bergbult och sprutbetong samt korrosionsförsöken på armeringsjärn. Det internationella pH-projektet kommer preliminärt att avslutas under 2011, men det nätverk som etableras kan möjligen leda till nya samarbetsprojekt.

I samband med planerad utbyggnad av Äspölaboratoriet med nya bergrum kommer eventuell injektering att genomföras med låg-pH-bruk, på motsvarande sätt som inom fintätningprojektet. Låg-pH-material kommer också att användas för ingjutning av bergbult och bergförstärkning i den mån denna typ av förstärkningar behövs. Konstruktion och bygge av en valvplugg, se avsnitt 13.4, kan också medföra behov av kompletterande försök med låg-pH-betong tillverkade enligt olika recept.

15.5.4 Deponeringshål

Nuläge

Borrmaskin

Vid Äspölaboratoriet har SKB borrar ett femtontal deponeringshål för olika experiment och demonstrationsprojekt. Dessa har utförts med TBM-teknik, anpassad för att borra vertikalt nedåt. Vidare har SKB erfarenheter av borring av deponeringshål med omvänd stigortsborring, dels från provborring av tre hål i Posivas undersökningstunnel för VLJ-förvaret för låg- och medelaktivt avfall i Olkiluoto /15-21/ och dels från borring av långa horisontella deponeringstunnlar för utvecklingen av KBS-3H vid Äspölaboratoriet, se kapitel 16.

Hösten 2006 genomfördes en förstudie av möjliga metoder för uttag av deponeringshål. Följande metoder ansågs då som intressanta att studera:

- Omvänd stigortsborring
- Schaktborrningsmaskin eller TBM-utrustning
- Vattenkluster
- Luftkluster
- Vattenjet
- Kärnborring

Baserat på förstudien valdes omvänd stigortsborring som referensmetod. Motiven var att omvänd stigortsborring har hög effektivitet, hög tålighet, hög säkerhet, uppfyller kraven på deponeringshållets geometri och ger liten miljöpåverkan. Metoden är dessutom väl etablerad teknik, vilket minskar tidsåtgång och kostnader för anpassning till SKB:s behov, samt bidrar till effektiv drift och underhåll.

Under 2007 och 2008 genomförde SKB en preliminär konstruktionsstudie av en maskin som uppfyller aktuell kravspecifikation för deponeringshålen. Konstruktionen är baserad på en maskin för konventionell, så kallad *raise boring* av schakt, men har modifierats för att kunna trycka upptrymningsskrapan nedåt i stället för att dra den uppåt. Maskinen är självgående och klarar själv att positionera sig korrekt i tunneln. Den har även med sig borrhöret för pilothållet och de borrhör som krävs för att borra pilothållet till fullt djup. Hanteringen av borrhörerna sker med en robotarm monterad på maskinen. När pilothållet är klart sker upptag av hela borrhörsträngen och pilotkronan byts mot en upptrymningsskrapa som rymmer upp deponeringshålet till full diameter i ett steg. Först ska dock pilothållet karakteriseras och godkännas. Avlägsnandet av borrhöraxet planeras ske med vatten i stället för vakuum/luft eftersom hantering med vatten kräver mycket mindre energi.

Färdigställande av deponeringshål

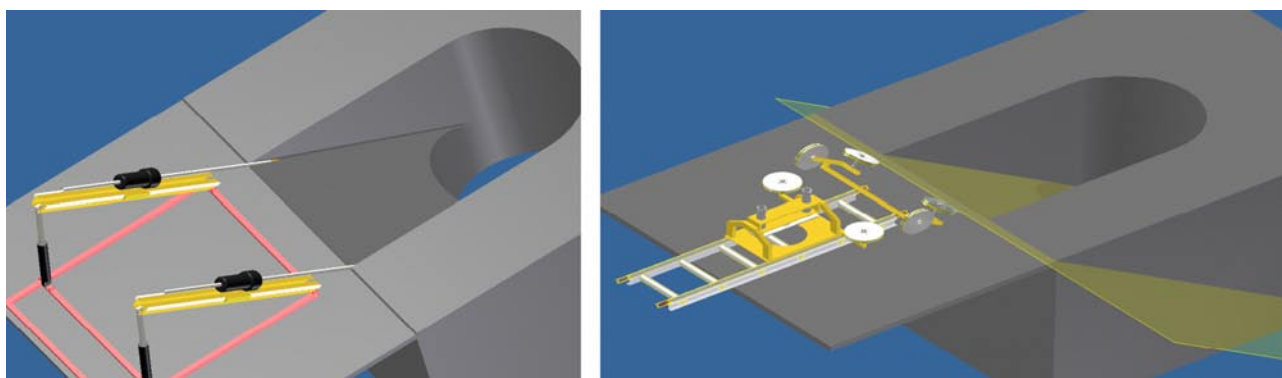
Deponeringshålets botten måste avjämnas så att en tillräckligt plan yta fås för att buffertblock och buffertringar ska kunna installeras i enlighet med de krav som gäller. Nuvarande referenslösning för detta redovisas i avsnitt 12.2.1. Erfarenheterna från bland annat bottenavjämnning av deponeringshålen i Prototypförvaret visar att tekniken behöver vidareutvecklas. Ett praktiskt problem är att arbetet måste genomföras på botten av ett cirka åtta meter djupt schakt med diametern 1,75 meter.

För att färdigställa deponeringshålet krävs också en avfasning av övergången mellan deponeringstunneln och hålet, för att ge det utrymme som behövs för att föra ner en kapsel. Avfasning med teknik för linsågning med diamantvajer har gjorts för två deponeringshål i demonstrationstunneln på 420-metersnivån vid Äspölaboratoriet. Både borrhörning och linsågning kunde göras med standardutrustning. Principskisser på utrustningen för borrhörning av hålen för diamantvajern och efterföljande sågning visas i figur 15-6.

Program

Borrmaskin

SKB avser att gå vidare med konstruktionen av en borrmaskin för deponeringshål, enligt metoden omvänd stigortborrning. De geometriska kraven förutsätter att deponeringshål kan borraras inom små toleranser när det gäller diameter och lodlinje. Detta ställer speciella krav på positionering av maskinen, styvhet i systemet, samt kontroll av avvikelser under borrhörning. Målet är att kunna fullfölja konstruktionsarbetet så att en färdig utrustning är klar att tas i bruk när det första deponeringsområdet byggs. Tester av exempelvis hanteringsmetoder för borrhöraxet och detaljer i utformningen av borrhörkronan kan bli aktuella. Vidareutvecklingen av teknik för undersökning av deponeringshål (pilothål och efter rymning till full dimension) planeras att ske integrerat med utvecklingen av borrhörutrustningen.



Figur 15-6. Avfasning av deponeringshål med linsågning. Den vänstra figuren visar borrhörningen av hålen för diamantvajern, utförd med standardutrustning monterad på en fixtur. Därefter kan en diamantsatt vajer dras genom hålen och sågningen genomföras. Den högra figuren illustrerar detta. Utrustningen kommer att utformas så att den kan såga både sidoväggar och avfasningen utan att ändra uppställning.

Färdigställande av deponeringshål

Olika lösningar för bottenavjämning kommer att utvärderas. Programmet för de närmaste åren omfattar fördjupade studier för att på ett rationellt sätt kunna utföra avjämningen av botten på deponeringshålen genom mekanisk bearbetning eller avjämnande gjutning och lämpligt diffusions-skydd. Praktiska tester av vald metod förutses, men tidsplanen för dessa är beroende av när nya deponeringshål borras i Onkalo eller Äspölaboratoriet.

15.6 Verktyg för datahantering och visualisering

För att genomföra slutförvarsprojektet inom givna ramar måste hanteringen av data vara effektiv och spårbar. Modellering, projektering och bygge kommer att ställa höga krav på korta ledtider från beställning av undersökningar till leverans av kvalitetssäkrade data. Detta är utgångspunkten för vidareutvecklingen av databaser och verktyg för modellering och visualisering. Arbetet inleds med att befintliga system och verktyg utvärderas och en handlingsplan som ska styra utvecklingsarbetet upprättas. De system som behövs ska vara utvecklade och testade före byggstart.

15.6.1 Databaser

Platsundersökningarna har inneburit omfattande användning av databaser för insamling och lagring av data som sedan hämtats och nyttjats för modellering, projektering med mera. Baserat på dessa erfarenheter avser SKB att vidareutveckla och anpassa databassystemet för de behov som kommer att finnas under bygge och drift. Systemet ska då kunna länka och presentera geometrisk information om borrhål och tunnlar, tillsammans med resultat från undersökningar i dessa. Detta är nödvändigt bland annat för att kunna kontrollera att konstruktionsförutsättningarna uppfylls. Systemet ska även kunna användas för presentation av beslutsunderlag både i daglig drift och för långsiktig planering.

15.6.2 Visualiseringssystem

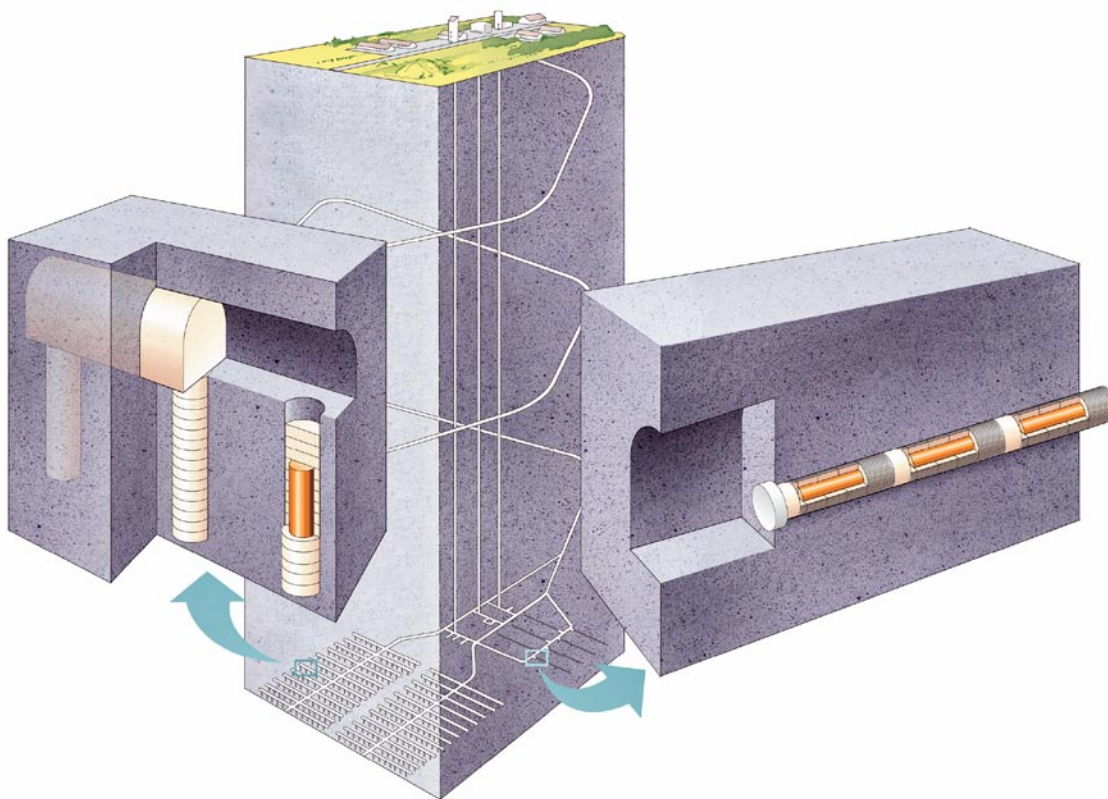
Den deterministiska geologiska modelleringen under platsundersökningarna gjordes med hjälp av det av SKB utvecklade systemet RVS (Rock Visualization System) som baseras på det kommersiella CAD-programmet MicroStation. Behovet av snabb, daglig geologisk modellering för byggverksamheten ställer krav på robusthet och användarvänlighet som systemet inte uppfyller i dag. En kravspecifikation som möter de nya arbetsprocesserna under bygge och drift ska tas fram som underlag för vidareutveckling. Kommersiellt tillgängliga system, främst från gruvbranschen, samt förutsättningarna att anpassa dessa för SKB:s tillämpningar kommer att utvärderas.

16 KBS-3H – horisontell deponering

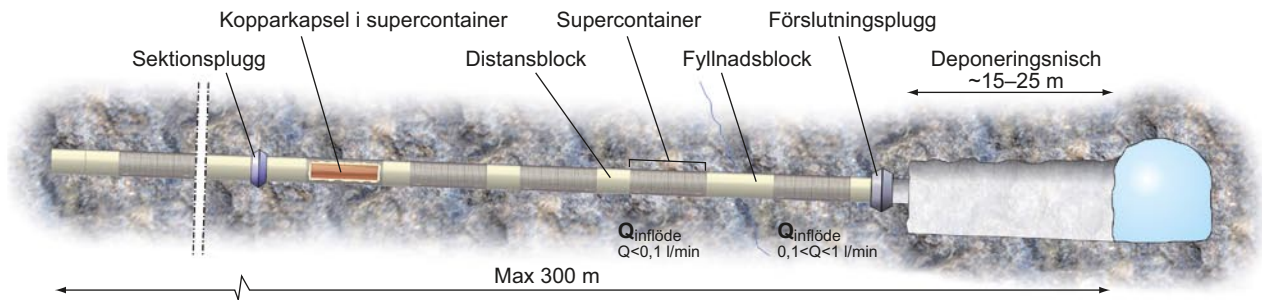
KBS-3-metoden gör det möjligt att deponera kapslarna vertikalt (KBS-3V) eller horisontellt (KBS-3H). Vertikal deponering utgör referensutförande, men SKB utreder även möjligheten att i ett senare skede övergå till horisontell deponering.

I både KBS-3V och KBS-3H omges kapseln av en buffert av bentonit, se figur 16-1. För KBS-3H behövs inga deponeringstunnlar, utan de långa horisontella deponeringshålens borrar direkt från stamtunneln, se figur 16-2. I deponeringshålen deponeras en rad så kallade supercontainrar. En supercontainer består av en kapsel omgiven av bentonitbuffert, sammanhållen av en perforerad ytterbehållare av metall. Mellan supercontainrarna placeras distansblock av bentonitlera, dels för att tätas tunneln så att vattenflöde längs tunneln förhindras, dels för att temperaturen i bufferten inte ska bli för hög. I deponeringshålens mynning installeras en förslutningsplugg. Pluggen håller supercontainrar och distansblock på plats till dess att stamtunneln har återfyllts. Avståndet mellan deponeringshålens är mellan 25 och 40 meter och beror på bergets egenskaper, främst värmeledningsförmågan. Den bergvolym som behöver tas ut för ett KBS-3H-förvar är betydligt mindre än vid vertikal deponering. Anläggningarna på driftområdet ovan mark påverkas marginellt av vilken av utformningarna som väljs.

Redan i början av 1990-talet utredde SKB möjligheterna att placera kapslarna horisontellt /16-1, 16-2/ och år 2001 presenterades forsknings-, utvecklings-, och demonstrationsprogram för KBS-3H /16-3/. Syftet var att utreda om horisontell deponering kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering. Under 2002–2007 genomförde SKB i samarbete med Posiva studier enligt detta program. Arbetet avrapporterades i slutet av 2007 /16-4/. Baserat på de resultat som uppnått beslutade SKB och Posiva att fortsätta med nästa etapp av forskningsprogrammet. Detta arbete inleddes år 2008.



Figur 16-1. Schematisk översikt av KBS-3-förvaret med vertikal (KBS-3V) respektive horisontell deponering (KBS-3H).



Figur 16-2. Principen för utformningen av ett KBS-3H-förvar.

16.1 Nuläge och program

I sitt yttrande över Fud-program 2007 framhöll SKI ett antal frågor som, enligt deras bedömning, behöver besvaras för horisontell deponering. Bland annat efterlyste SKI information om distansblockens funktion vid ojämn bevätning av bentoniten. Bevätningen har betydelse för uppbyggnaden av svälltryck i kontakten mellan deponeringshål och berg. Speciellt kan bevätningen bli ojämn vid lägen med bergutfall och/eller vatteninflöde i deponeringshålet. SKB gör nu bedömningen att med en utformning enligt den så kallade Dawe-utformningen, kan risken för ojämn bevätning elimineras, se avsnitt 16.1.1.

SKI framförde vidare att SKB bör utreda om det föreligger skillnader mellan KBS-3H och KBS-3V beträffande känsligheten för mekanisk påverkan av berget, särskilt vid höga bergspänningar. Om belastningarna leder till spjälkning/bergutfall i ett deponeringshål kan det medföra praktiska svårigheter att få containern på plats. Detsamma kan enligt SKI gälla om bentoniten på grund av fuktig atmosfär i deponeringshålet börjar svälla innan containern förts in till sin slutliga position.

Sedan Fud-program 2007 presenterades har utrustning för deponering av supercontainer och distansblock tagits fram och testats i ett av de två horisontella deponeringshålen med full diameter vid Äspölaboratoriet. Borrningen av hålen, 95 respektive 15 meter långa, har i sig utgjort en viktig test. Efter en del modifieringar har tekniken för att transportera supercontainrar i hålen visat sig fungera, och utrustningen har körts närmare 50 km, fram och tillbaka i 95-metershålet. Nu pågår arbete med att förbättra och optimera tekniken. Målet är att ta fram en funktionell metodik och utrustning med hög tillförlitlighet. De båda horisontella deponeringshålen används även för att testa olika komponenter; bland annat studeras efterinjektering med hjälp av en så kallad Mega Packer samt pluggning med en sektionsplugg.

En bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett tänkt KBS-3H-förvar i Olkiluoto har genomförts och redovisats av Posiva /16-5/. Analysen baseras på en preliminär utformning och layout av förvaret.

Huvudmålet för pågående aktiviteter är att vidareutveckla utformningen av KBS-3H så långt att det i en nästa etapp är möjligt att demonstrera tekniken i full skala. För att uppnå detta krävs belägg för att:

- den framtagna utformningen är genomförbar med avseende på konstruktion, tillverkning och installation,
- buffert i supercontainrar och distansblock samt supercontainer och pluggar fungerar som tänkt efter deponering, det vill säga att initialtillståndet uppnås,
- de material som används till supercontainer och pluggar inte försämrar buffertens barriärfunktion, det vill säga att bufferten klarar de krav som gäller med hänsyn till långsiktig säkerhet.

Förutsatt att SKB och Posiva beslutar att gå vidare med KBS-3H planeras för följande aktiviteter under den aktuella FUD-perioden:

- ta fram produktionslinjerapporter, specifika för KBS-3H, och uppdatera övrig utformnings-specifik dokumentation,
- genom demonstration verifiera systemkomponenter i full skala,
- genomföra en bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett tänkt KBS-3H-förvar i Forsmark.

16.1.1 Utformning av ett KBS-3H-förvar

Utformningen av KBS-3H har vidareutvecklats sedan Fud-program 2007. Principen är fortfarande densamma (figur 16-2) men en teknik för dränering, artificiell bevätning och avluftning har vidareutvecklats. Utformningen benämns Dawe (Drainage, Artificial Watering and air Evacuation) och utgör nu referensutformning för KBS-3H. Dawe-utformningen baseras på artificiell bevätning för att uppnå snabbare och jämnare kontakt mellan buffert och bergvägg. Innan supercontainrarna och distansblocken deponeras monteras ett rör för avluftning längs tunnelväggen. Under installationen får inläckande vatten självrinna ut längs tunnelgolvet vilket möjliggörs genom att supercontainrar och distansblock står på distanser och vatten kan då rinna under dessa. Genom att tomrummen i deponeringshålet sedan artificiellt fylls med vatten genom sektionspluggen (för att bufferten ska svälla snabbt) kan ojämnbévätning och större tryckgradienter i systemet undvikas. Avluftsriörret dras bort från deponeringshålet innan bufferten hunnit bygga upp ett för stort svälltryck. För att blocken inte ska skadas av luftfuktigheten under installationen har bufferten i Dawe-utformningen högre vattenhalt /16-6/.

I Fud-program 2007 redovisade SKB vilka utvecklingsfrågor som är viktiga för att KBS-3H ska kunna nå en likvärdig teknisk nivå som KBS-3V. Bland annat nämndes metoder för att hantera vatteninflöden samt layoutstudier för att ge underlag för att bedöma vilka bergspänningar man måste ta hänsyn till och hur dessa påverkar risken för spjälkning, se avsnitt 16.1.3.

För att säkerställa buffertens kvalitet måste vattenflödet längs deponeringshålen kunna hanteras. Genom att efterinjektera med en så kallad Mega Packer är det möjligt att, på de ställen där ett deponeringshål skärs av en vattenförande spricka, täta deponeringshålet utan att borra några injekteringshål utanför tunnelkonturen. Mega Packern består av en stålcyliuder som lämnar en 1,5 centimeter bred spalt till deponeringshålets väggar, se figur 16-3. Spalten tillsluts i cylinderns båda ändar med hjälp av två hydrauliska manschetter, varvid en 1,5 meter lång isolerad sektion skapas. Sprickan kan därefter karakteriseras hydrauliskt varpå berget i den avgränsade sektionen injekteras med Silica sol eller låg-pH-cement. Metoden har provats i Äspölaboratoriet med mycket positivt resultat /16-6/.

För att genomföra installationen av supercontainern, och för att kunna använda en större del av deponeringshålet även vid stora inflöden i enskilda sprickzoner, måste det vara möjligt att skärma av mycket transmissiva sprickzoner. Detta kan ske genom att så kallade sektionspluggar placeras på båda sidor om den vattenförande sprickzonen i deponeringshålet. SKB har utvecklat teknik för detta. En slits sågas ut och en infästningsring, som deponeringsutrustningen kan passera över, gjuts in. Senare, när deponeringsarbetet innanför pluggens position har slutförts, monteras en stålplugg i denna ring. Pluggen har flera hål vilket möjliggör pelletsfyllnad, artificiell bevätning och avluftning av sektionen innanför. Arbete med att testa en sektionsplugg pågår sedan 2009 vid Äspölaboratoriet, se avsnitt 16.1.2.

För att underlätta bevätning av bufferten i deponeringshålen används sektionspluggar i Dawe-utformningen. De 300 meter långa deponeringshålen delas upp i cirka 150 meter långa sektioner. Supercontainrar och distansblock placeras i sektioner där vatteninflödet är mycket lågt (< 0,1 liter per minut), se figur 16-2. Distansblockens huvudfunktion är att separera supercontainrarna hydrauliskt och termiskt. I sektioner där inflödet är större än 0,1 liter per minut men mindre än en liter per minut placeras fyllningsblock av bentonit. De ska primärt kunna motstå erosion och stödjafunktionen hos distansblocken. I deponeringshålets mynning placeras en förslutningsplugg. Den ska sluta tätt till dess att deponeringsnischen och stamtunnlarna har återfyllts.

Alternativa material för metallbehållaren runt supercontainern har studerats. Val av referensmaterial – stål, koppar eller titan – kommer att göras under pågående projektfas. Den viktigaste faktorn för långtidssäkerheten är materialens påverkan på bentoniten vilket utretts i omfattande studier, se avsnitt 16.1.3. Korrosionsprodukter och godstjocklek påverkar materialvalet. Detta påverkar i sin tur bentonitblockens storlek och i slutänden uppnådd densitet vid full vattenmättnad. Studierna har därför inkluderat hur olika material skulle påverka såväl buffertens egenskaper som deponeringshålets storlek. Koppar har sämre hållfasthetsegenskaper än stål och titan. Om koppar väljs måste därför supercontainerns bottendel utföras med tjockare gods och bredden på distanserna, som skapar utrymme för deponeringsmaskinens släde, ökas.

En preliminär layout för ett tänkt KBS-3H-förvar i Forsmark har tagits fram. Stamtunnlarna har i stort sett samma lägen som i layouten för KBS-3V-förvaret. Deponeringstunnlarna har utgått och ersatts av KBS-3H-förvarets horisontella deponeringshål. Två alternativa layouter har studerats; en med 30 meter och en med 40 meter mellan deponeringshålen. Deponeringshålen delas upp i två sektioner med en sektionsslugg. Ett KBS-3H-förvar i Forsmark beräknas rymma drygt 7 000 kapslar om avståndet mellan deponeringshålen är 30 meter och knappt 6 000 kapslar om avståndet är 40 meter. Trots att den specifika förvarsarean per kapsel blir större för ett KBS-3H-förvar än för ett KBS-3V-förvar blir den totala bergvolymen som behöver tas ut avsevärt mindre.

Program

Dawe-utformningen med dess olika komponenter ska utvärderas och verifieras mer i detalj. Bland annat kommer ett omfattande testprogram att genomföras i Äspölaboratoriet, se avsnitt 16.1.2.

Påbörjat arbete med rapporter för produktionslinjer och anläggningsbeskrivning kommer att fortsätta. Likaså pågående arbete med geometriska kriterier för deponeringshålet och borrhälsborrteknik. Det senare arbetet syftar till att studera behovet av att uppdatera kraven på deponeringshålet och att finna lämplig utrustning för att mäta och verifiera att borrhålet uppfyller dessa krav.

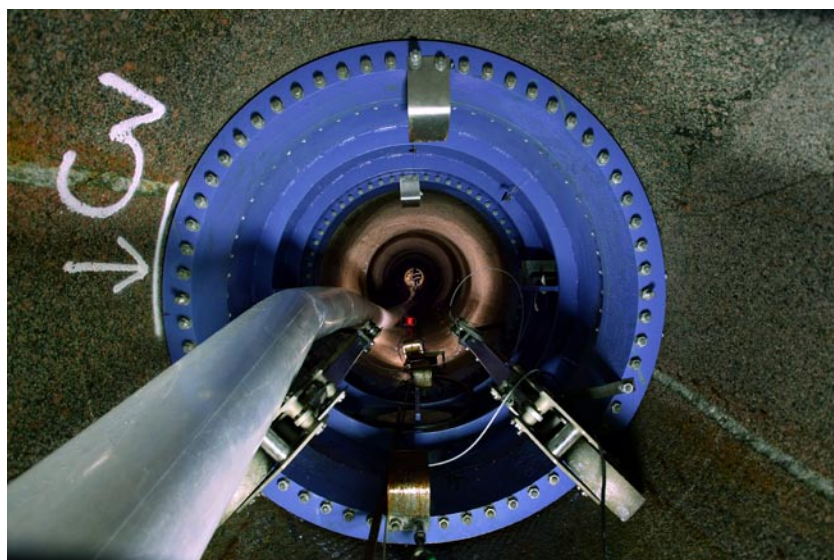
Ytterligare frågor som kommer att studeras är:

- montering av röret för avluftning längs med väggen innan supercontainrar och buffertkomponenter lyfts in samt demontering av detta rör genom sektionssluggen,
- påverkan av material hos supercontainrar och pluggar.

16.1.2 Demonstration i Äspölaboratoriet

Deponeringsutrustningen levererades och installerades i Äspölaboratoriet under 2006. En serie tester och försök med utrustningen har genomförts. Deponeringsmaskinen har körts närmare 50 kilometer i 95-metershålet, dels med supercontainer och distansblock gjorda av betong men även utan last. Testerna, som utförts i full skala, har visat att utrustningen fungerar tekniskt /16-7/. Fortsatt tekniskt utvecklingsarbete har inletts för att säkerställa långsiktig funktionalitet.

Mega Packern har testats i det 95 meter långa deponeringshålet på 220 meters djup, se figur 16-3. Totalt injekterades fem positioner med ett inläckage på mellan 0,15–2,40 liter per minut. Silica sol användes som injekteringsmedel och totalflödet ut från deponeringshålet sänktes från cirka fyra liter per minut till cirka 0,4 liter per minut /16-8/.



Figur 16-3. Mega Packer för efterinjektering i ett horisontellt deponeringshål placerad i 95-metershålet på Äspölaboratoriet.

En sektionsplugg har installerats i en slits, som sågades ut i det 15 meter långa deponeringshålet. Pluggen trycksattes stegvis till 50 bar. Initialt översteg läckaget runt pluggen ansatta krav, men efter injektering med Silica sol i förinstallerade injekterings slangar i gjutningen uppnåddes en täthet väl i nivå med angivna värden. Testet visar att konceptet med sektionspluggar är genomförbart och att tillräcklig täthet kan uppnås. Förslutningspluggarna har liknande design som sektionspluggarna och de positiva resultaten med sektionspluggarna tyder på att även förslutningspluggarna bör fungera tillfredställande. Ytterligare tester av sektionspluggen är planerade inom nuvarande projektfas. Resultat och erfarenheter kommer att avrapporteras i samband med att nuvarande projektfas avslutas.

Laboratorietester av demontering av vattenrör i Dawe-utformningen visar att rören kan tas ut som planerat. Men testerna har även indikerat att demontaget måste ske i ett relativt tidigt skede av svällningsprocessen, eftersom den kraft som krävs för att dra ut rören ökar i snabb takt när bufferten börjar svälla. Erosionstester indikerar att man kan använda korta rör när sektionen fylls, vilket bör kunna minska riskerna vid demontering då endast ett långt rör kvarstår, avluftningsröret.

Program

För närvarande pågår arbete med att ta fram ett program för fortsatta tester av KBS-3H vid Äspö-laboratoriet. Preliminärt kommer programmet att omfatta delsystemtester där flera komponenter testas tillsammans.

För att möjliggöra deponering i de uppemot 300 meter långa deponeringshålen, måste dessa uppfylla strikta geometriska krav. Detta är en nyckelfråga för horisontell deponering. För att klara kraven måste borrhningen åstadkomma raka pilothål som sedan kan rymmas upp till full diameter. Därför kommer några pilothål att borraras och rakhetskontrolleras. Borrhningarna kommer att utföras i Äspölaboratoriet, på djup motsvarande förvarsdjup. Delar av ett pilothål kommer att rymmas upp till full diameter. Parallellt med borrhningarna kommer de geologiska och hydrogeologiska förhållandena att studeras och jämförelser kommer att göras mellan utvärderad data från pilothål och data från det fullskaliga deponeringshålet. Deponeringshålet kommer även att användas för försök med Mega Packern vid relevant grundvattenstryck, eventuellt också tester av spjälkningsprocesser i bergväggen. Ett deponeringshål på förvarsdjup gör det också möjligt att i framtiden utföra systemtest under realistiska förhållanden.

Utöver testerna på förvarsdjup så planeras integrerade tester för att demonstrera och prova flera av KBS-3H-förvarets komponenter tillsammans, dessa tester kommer preliminärt att utföras i det befintliga 95 meter långa deponeringshålet på 220 meters djup. Dessa delsystemtester syftar bland annat till att:

- visa fullskalig tillverkning, hantering och transport av en supercontainer med bentonitbuffert,
- demonstrera tekniken att deponera supercontainer och buffertkomponenter av bentonit,
- testa Dawe-utformningen med fullskalig artificiell bevätning av bufferten i supercontainern och distansblock,
- demonstrera sektionspluggens funktion vid artificiell bevätning.

16.1.3 Långsiktig säkerhet

Ett KBS-3H-förvar har stora likheter med ett KBS-3V-förvar. Det gäller till exempel egenskaperna hos det använda bränslet, kopparkapseln och bentonitbufferten, samt förhållandena i geosfären och biosfären. En säkerhetsbedömning för ett KBS-3H-förvar kan därför utgå från kunskap som utvecklats inom ramen för KBS-3V-programmen i Sverige och Finland, och därefter fokusera på frågeställningar som är specifika för KBS-3H. De viktigaste är:

- I KBS-3H är deponeringshålen långa och det finns risk för att man får kanalbildning och erosion av buffert och distansblock innan bentoniten har blivit vattenmättad.
- Hur man kan undvika processer som kan inverka på flera kapslar i tunneln, till exempel spjälkning av berget och bildandet av transportvägar längs med deponeringstunneln.
- KBS-3H har i nuvarande referensutformning flera komponenter av stål. Järnet kommer att korrodera varvid vätgas bildas. Detta kan bland annat leda till ökad mikrobiell aktivitet och att det bildas tryckgradienter i systemet. Järnet kan också påverka bentonitens fysikaliska och kemiska egenskaper.

En preliminär bedömning av den långsiktiga säkerheten har utförts för ett KBS-3H-förvar med data från Olkiluoto, den valda platsen för ett slutförvar i Finland. Arbetet har redovisats i ett antal delrapporter samt en sammanfattande rapport /16-5/. Säkerhetsbedömningen utgick från den ursprungliga utformningen av KBS-3H, benämnd Basic Design, som i ett senare skede av projektet inte ansågs vara tillräckligt robust och genomförbar. I stället har Dawe valts som referensutformning. Slutsatsen från säkerhetsbedömningen är att KBS-3H, med avseende på den långsiktiga säkerheten och för de förhållanden som råder vid Olkiluoto, är en lovande utformning för ett förvar på denna plats.

Säkerhetsbedömningen har granskats av den finska Strålsäkerhetscentralen (STUK), som lämnade kommentarer i slutet av 2009. I kommentarerna tar STUK bland annat upp effekter från järnkomponenter, funktionalitet hos buffert samt spjälkning. Även SSM har genom sin externa expertgrupp BRITE (the Barrier Review, Integration, Tracking and Evaluation) genomfört en omfattande utvärdering av arbetet med KBS-3H. I sin rapport tar expertgruppen upp ett flertal frågor som kräver ytterligare forskning för att en fullständig utvärdering av genomförbarhet och långsiktig säkerhet ska kunna genomföras för KBS-3H /16-9/.

Huvuddelen av de frågor som tagits upp av STUK och SSM har studerats inom KBS-3H-projektet under pågående projektfas. Frågan om inverkan av järn på bentonit har utretts ytterligare sedan 2007 och preliminära resultat visar att järn reagerar med bentonitleran på flera sätt i samband med korrosionsprocesserna. Den preliminära geokemiska modelleringen med data från Olkiluoto visade att en påverkan av järn på bentonit begränsades till ett par centimeter för en period på upp till flera hundra tusen år /16-10, 16-11/. De problem som kan uppstå på grund av att järn påverkar bufferten har föranlett KBS-3H-projektet att studera de alternativa materialen koppar och titan, se även avsnitt 24.2.18.

Buffertens utveckling har undersökts under förhållanden som är specifika för KBS-3H. Exempelvis har erosion under vattenfyllnad (Dawe) testats i laboratorieskala. Teoretiska studier av spjälkning av deponeringshålen har utförts. Studierna indikerar att bergspänningarna sannolikt inte kommer att kunna leda till spjälkning. Tillkommande termiskt inducerade belastningar som skulle kunna initiera spjälkning uppkommer tidigast 1–10 år efter deponering.

Program

Effekten och utbredningen av den påverkade zonen vid interaktioner mellan järn och buffert kommer att utvärderas med hjälp av resultat från långtidsförsök i laboratorieskala. Dataunderlag ska sammanställas och användas för att modellera reaktions- och transportmekanismer i bufferten. Korrosionen av järn leder till att vätgas bildas, varför effekterna av vätgas och korrosionsprodukter på porvattnet i bufferten ska modelleras. Supercontainerns påverkan i gränzonen mellan buffert och berg ska klarläggas och storleken för de störningar på grundvattenflöde och påverkan på masstransport som kan accepteras ska beräknas. Målet är att studierna tillsammans med övriga materialstudier (titan och koppar) ska ge underlag för att välja ett referensmaterial till samtliga metallkomponenter i ett KBS-3H-förvar.

Pågående arbete med att utforma KBS-3H-förvarets komponenter är direkt kopplat till den långsiktiga säkerheten, exempelvis är buffertens förmåga att utveckla ett mottryck viktig för att minimera risken för termiskt inducerad spjälkning. Konstruktionsförutsättningar för KBS-3H-förvarets komponenter med hänsyn till långsiktig säkerhet kommer att sammanställas.

Under förutsättning att SKB och Posiva beslutar att arbetet med KBS-3H ska drivas vidare kommer en platspecifik bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-förvar i Forsmark att utföras, efter det att SR-Site slutförts. Analysen kommer att bygga på resultaten från SR-Site, med kompletterande analyser av de delar som är specifika för KBS-3H. Syftet är att kunna jämföra säkerheten för de två förvarsutformningarna och att i ett senare skede kunna göra ett väl underbyggt val mellan KBS-3V och KBS-3H.

Del IV

Forskning för analys av långsiktig säkerhet

- 17 Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet
- 18 Säkerhetsanalys
- 19 Klimatutveckling
- 20 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall
- 21 Tekniska barriärer i SFR
- 22 Bränsle
- 23 Kapsel
- 24 Buffert och återfyllning
- 25 Geosfären
- 26 Ytnära ekosystem
- 27 Andra metoder

17 Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet

Här ges en översikt av SKB:s naturvetenskapliga forskningsprogram inom ramen för våra säkerhetsanalyser, det vill säga analyserna av långsiktig säkerhet för Kärnbränsleförvaret samt för utbyggnaden av SFR (slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall). Planerna för slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL, beskrivs i del II, Loma-programmet. Mycket av den forskning som relaterar till Kärnbränsleförvaret samt SFR är också relevant för den forskning som kommer att bli aktuell även för säkerhetsanalysen för SFL.

Forskning relaterad till säkerhetsanalys för ett slutförvar för radioaktivt avfall innefattar både övergripande områden, som inte kopplar specifikt till något förvarssystem, och den forskning som relaterar mer direkt till förvarssystemen.

Den forskning som bedrivs med syfte att öka kunskapen om den långsiktiga säkerheten för slutförvaret för använt kärnbränsle har främst skett inom ramen för projektet SR-Site. Där finns grunden för forskningens fokus på processer i de tekniska och naturliga barriärer som ingår i förvarskonceptet. Tabell 17-1 ger en översikt över processerna samt storleken på den insats som planeras över kommande treårsperiod.

Forskning specifikt relaterad till säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR behandlas i kapitel 20 och 21. Forskning rörande buffert innefattar även forskning kring lerbarriärer i SFR och behandlas i kapitel 24. De processer som studeras för säkerhetsanalysen för Projekt SFR-utbyggnad (PSU) sammanställs i tabell 17-2.

En översiktlig introduktion till de olika forskningsområdena ges nedan. Dessutom ges en sammanställning av kopplingen mellan forskningsprogrammet och de olika projekt som bedrivs i Äspö-laboratoriet samt en översikt av forskning vid Nova FoU i Oskarshamn.

Forskningsprogrammet innefattar även bevakning av andra metoder för att ta hand om det använda kärnbränslet. SKB följer utvecklingen av forskningen kring separation och transmutation, samt deponering i djupa borrhål.

17.1 Övergripande forskningsområden

Vissa forskningsområden har en övergripande karaktär och kopplar inte till något specifikt förvarssystem. Dessa områden är Säkerhetsanalys (kapitel 18), Klimatutveckling (kapitel 19), Geosfär (kapitel 25) samt Ytnära ekosystem (kapitel 26).

Framtida klimatförändringar kan innebära glaciation och permafrost. Dessa två företeelser har stora inverknings på den naturliga miljön runt ett slutförvar. Därför kan klimatet indirekt påverka barriärerna i ett förvar och därmed utfallet av en säkerhetsanalys.

En mängd processer i berget, den naturliga barriären, påverkar utfallet av en säkerhetsanalys. Väsentliga processer i geosfären är bland annat sprickbildning, grundvattenströmningar, vattenkemi och jordskalv. Radionuklidtransport och retention i berget ingår i modelleringen av dessa processer.

Platsdata och framtagna modeller av ekosystemet i Forsmark ligger till grund för forskningen inom Ytnära ekosystem. I forskningen ingår arbete med numeriska modeller för dosberäkningar.

17.2 Forskning kopplad till förvarssystem

Den forskning som specifikt relaterar till slutförvaret för använt kärnbränsle och säkerhetsanalysen SR-Site sker inom forskningsområdena Bränsle (kapitel 22), Kapsel (kapitel 23) samt Buffert och återfyllning (kapitel 24).

Tabell 17-1. Processer i bränsle, kapsel, buffert och återfyllnad samt geosfär.

Typ av process	Bränsle	Kapsel	Buffert och återfyllning	Geosfär
R (strårelaterade)	Radioaktivt sönderfall 22.2.2 Stråldämpning/värmealstring 22.2.3 Inducerad fission – kriticitet 22.2.4	Stråldämpning/värmealstring 23.2.1	Stråldämpning/värmealstring 24.2.2	
T (termiska)	Värmetransport 22.2.1	Värmetransport 23.2.1	Värmetransport 24.2.3 Frysning 24.2.4	Värmetransport 25.2.2
H (hydrauliska)	Vatten- och gastransport i kapsels hålrum, kokning/kondensation 22.2.1		Vattentransport vid omättade förhållanden 24.2.5 Vattentransport vid mättade förhållanden 24.2.6 Gastransport/gaslösning 24.2.7 Piping/erosion 24.2.8	Grundvattenströmning 24.2.3 Gasströmning/gaslösning 25.2.4
M (mekaniska)	Termisk expansion/kapslingsbrott 22.2.1	Deformation gjutjärnsinsats 23.2.2 Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck 23.2.3 Deformation från inre korrosionsprodukter 23.2.4 Termisk expansion 23.2.1 Strålpåverkan 23.2.5	Mekaniska processer (inklusive svällning) 24.2.9 Termisk expansion 24.2.10	Rörelser i intakt berg 25.2.5 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor 24.2.7 Sprickbildning 25.2.8 Tidsberoende deformationer 25.2.9 Termisk rörelse 25.2.6
C (kemiska)	Advektion och diffusion 22.2.1 Restgasradiolys/syrabildning 22.2.1 Vattenradiolys 22.2.5 Metallkorrosion 22.2.1 Bränsleupplösning 22.2.6 Lösning av gapinventarium 22.2.1 Speciering av radionuklider, kolloidbildning 22.2.7 Heliumproduktion 22.2.8	Korrosion gjutjärnsinsats 23.2.6 Galvanisk korrosion 23.2.1 Spänningskorrosion gjutjärnsinsats 23.2.1 Korrosion kopparkapsel 23.2.7 Spänningskorrosion kopparkapsel 23.2.8 Jordströmmar – läckströmskorrosion 23.2.1	Advektion 24.2.12 Diffusion 24.2.13 Osmos 24.2.14 Jonbyte/sorption 24.2.15 Montmorillonitomvandling 24.2.16 Järn-bentonit interaktioner 24.2.17 Lösning/fällning föroreningar 24.2.18 Cementering 24.2.19 Kolloidfrigörelse/erosion 24.2.20 Stråлиндucerad montmorillonitomvandling 24.2.21 Radiolys av porvatten 24.2.22 Mikrobiella processer 24.2.23	Advektion/blandning – grundvattenkemi 25.2.10 Diffusion – grundvattenkemi 25.2.12 Reaktioner med berget – grundvattenkemi 25.2.14 Mikrobiella processer 25.2.16 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial 25.2.17 Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten 25.2.18 Gasbildning/gaslösning 25.2.20 Metanisomsättning 25.2.21 Saltutfrysning 25.2.22
Integration/modellering			THM utveckling omättad 24.2.11	DFN 25.3.1 THM-utveckling 25.3.2 HC-utveckling 25.3.3
Radionuklidtransport			Advektion/blandning 24.2.24 Diffusion 24.2.25 Sorption 24.2.26 Speciering 24.2.27 Kolloidtransport 24.2.28 RN-transport närområde 24.3	Advektion/blandning 25.2.11 Diffusion 25.2.13 Sorption 25.2.15 Kolloidtransport 25.2.19 RN-transport geosfär 25.3.4
	RN-transport närområde	RN-transport närområde		

Tabell 17-2. Processer i kortlivat låg- och medelaktivt avfall samt barriärer för detta.

Kod: Stora insatser Måttliga insatser Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod		
Typ av process	Avfall	Tekniska barriärer och återfyllning
T (termiska)		Värmetransport 21.2.2
	Frysning 20.2.2	Frysning 21.2.3
H (hydrauliska)	Vattenuptag i jonbytare och bitumen 20.2.3	
	Vattentransport 20.2.4	Vattentransport 21.2.4
	Tvåfasflöde/gastransport 20.2.5	Tvåfasflöde/gastransport 21.2.5
M (mekaniska)	Expansion/kontraktion av avfallet 20.2.6	Expansion/kontraktion 21.2.6
	Sprickbildning 20.2.6	Sprickbildning 21.2.7
	Bergutfall 20.2.8	Bergutfall 21.2.8
C (kemiska)	Upplösning/utfällning 20.2.9	Upplösning/utfällning 21.2.9
	Degradering av organiska ämnen 20.2.10	Kemisk cement- och betongdegradering 21.2.10
	Korrosion 20.2.12	Korrosion 21.2.11
	Speciering 20.2.11	Sorption 21.2.12
	Diffusion 20.2.13	Diffusion 20.2.13
	Advektion och blandning 20.2.14	Advektion och blandning 20.2.14
	Kolloidbildning/kolloidtransport 20.2.15	Kolloidbildning/kolloidtransport 21.2.15
	Mikrobiell aktivitet 20.2.16	Mikrobiell aktivitet 21.2.16
	Radiolytisk degradering 20.2.17	
Modellering – radionuklidtransport		Utveckling av beräkningskoder 21.3.3

Forskning relevant för SFR och säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet (SR-PSU) sker inom områdena Kortlivat låg- och medelaktivt avfall (kapitel 20), samt Tekniska barriärer i SFR (kapitel 21).

Kärnbränsleförvaret

Kunskapsnivån för säkerhetsanalysen SR-Site bedöms nu vara så hög att det är möjligt att gränssätta betydelsen av identifierade osäkerheter. Forskningsprogrammet fortsätter för att vi ska få ytterligare kunskap och kunna reducera kvarvarande osäkerheter. Därigenom bör mer realistiska bedömningar av Kärnbränsleförvarets säkerhetsmarginal kunna göras i framtida säkerhetsanalyser.

Det använda bränslets egenskaper samt de processer som sker om bränslet kommer i kontakt med vatten, utgör en väsentlig del av forskningen för säkerhetsanalysen SR-Site. Vissa av dessa processer är starkt bundna till initialtillståndet (typ av bränsle, utbränningsgrad med mera) och information om detta återfinns i kapitel 10 (del III) samt i kapitel 22.

Kapselns förmåga att isolera bränslet är väsentlig och forskning inom ramen för säkerhetsanalysen är fokuserad kring de processer som kan förväntas ske efter deponering. Viktiga processer är korrosion och mekaniska belastningar. Kunskap om initialtillståndet för kapseln presenteras i kapitel 11 (del III) samt i kapitel 23.

Alla processer i bufferten efter deponering, till exempel vattenuptag och svällning, eller frysning och erosion, är viktiga för utfallet av säkerhetsanalysen SR-Site. Många processer i återfyllningen är i det närmaste identiska med de som sker i bufferten och forskning kring detta presenteras därför gemensamt med bufferten i kapitel 24.

SFR

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall placeras i dag i SFR i Forsmark. På SKB pågår arbete med säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet. De processer som sker i denna typ av avfall är specifika för avfallstypen och forskningsprogrammet fokuserar på korrosion och degradering av organiska ämnen i avfallet, se kapitel 20.

De tekniska barriärer som används i SFR samt planeras för utbyggnaden, påverkas till stor del av processer som sker i cement och betong vilket avspeglas i forskningsprogrammet, se kapitel 21. Forskning kring de processer som sker i de lerbarriärer som används i SFR (silobufferten) presenteras gemensamt med forskning kring buffert och återfyllning i kapitel 24.

17.3 Forskning i Äspölaboratoriet och Nova FoU

17.3.1 Forskning i Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet är en hörnsten i SKB:s program för forskning och teknikutveckling. Syftet med flera av projekten som pågår på Äspölaboratoriet är att ge ökad kunskap om långsiktig säkerhet. Dessa projekt handlar främst om processer i kapsel, buffert och berggrund. I tabell 17-3 ges ett antal exempel på projekt i Äspölaboratoriet som helt eller delvis är inriktade på långsiktig säkerhet samt hänvisning till var i detta Fud-program projektet beskrivs.

Intresset för forskning vid Äspölaboratoriet är stort inte bara inom Sverige, utan även internationellt. Ett flertal organisationer från olika länder deltar i det internationella samarbetet som bedrivs i Äspölaboratoriet. I Äspö International Joint Committee ingår Andra (Frankrike), BMWi (Tyskland), CRIEPI & JAEA (Japan), NWMO (Kanada) och Posiva (Finland). De utländska organisationerna deltar både i det experimentella arbetet och i modelleringsarbetet inom Task Force-grupperna.

Tabell 17-3. Översikt över Äspö-projekt med koppling till forskning om långsiktig säkerhet.

För lokalisering av projekten i Äspölaboratoriet, se figur 1-10.

Projekt	Process	Avsnitt
Minican	Deformation inre korrosionsprodukter	23.2.4
Lot-försöket	Montmorillonitombvandling	24.2.16
	Korrosion kopparkapsel	23.2.7
Alternativa buffertmaterial	Vattentransport mättade förhållanden	24.2.6
	Järn-bentonit interaktioner	24.2.17
Lasgit	Gastransport/gaslösning	24.2.7
	THM-utveckling buffert	24.2.11
TBT-försöket	Vattentransport mättade förhållanden	24.2.6
	THM-utveckling buffert	24.2.11
Återtagningsförsöket (CRT)	Vattentransport omättade förhållanden	24.2.5
Apse (Pelarförsöket)	Röresler intakt berg	24.2.5
Prototypförvaret	Värmetransport (buffert)	24.2.3
	THM-utveckling buffert	24.2.11
	Vattentransport omättade förhållanden	24.2.5
	Vattentransport mättade förhållanden	24.2.6
	Piping/erosion	24.2.8
	Värmetransport (geosfären)	25.2.2
	Termisk rörelse	25.2.6
	Sprickbildning	25.2.8
	Tidsberoende deformation	25.2.9
	Integrerad modellering THM (geosfären)	25.3.2
	True	Advektion/blandning – radionuklidtransport
Integrerad modellering – radionuklidtransport		25.3.4
LTDE	Diffusion – radionuklidtransport	25.2.13
	Reaktioner med berget – sorption	25.2.15
Kolloidtransportprojektet	Kolloidomsättning	25.2.18
Mikrobprojekten	Mikrobiella processer	25.2.16
Matrisförsöket	Diffusion – grundvattenkemi	25.2.12
Padamot	Diffusion – grundvattenkemi	25.2.12
Swiw-tester	Integrerad modellering – radionuklidtransport	25.3.4

17.3.2 Forskningsbreddning vid Nova FoU

Nova FoU (www.novafou.se) är en plattform för forskning och utveckling inom ramen för Nova Högskolecentrum i samarbete mellan SKB och Oskarshamns kommun. Som sådant är Nova FoU ett kompetenscentrum där flera universitet, bland annat Linnéuniversitetet, och andra högskolor och företag, både från Sverige och andra länder, genomför forsknings- och utvecklingsprojekt. För att nå upp till vad som är ambitionen, ett centrum i världsklass, kommer information om de nya forskningsmöjligheterna via Nova FoU kopplat till SKB:s laboratorier att intensifieras nationellt och internationellt.

Nova FoU har, genom avtal, tillgång till SKB:s laboratorier (Äspölaboratoriet, Bentonitlaboratoriet och Kapsellaboratoriet), data och kompetens. Forsknings- och utbildningsprojekten bedrivs i dessa anläggningar med olika universitet och företag som ägare. Projekten har utgångspunkt i de unika möjligheter SKB:s laboratorieverksamhet, undersökningsdatabaser och kompetensinfrastruktur ger. Forskningen kan vara av varierande karaktär inom flera vetenskapsområden, men fokus är på geofärsforskning och utveckling som kopplar till hydrogeokemi, hydrogeologi, geologi och teknik i jord och berg. De huvudsakliga inriktningarna är grundforskning, miljöforskning och instrumentutveckling. Exempel på pågående projekt inom Nova FoU ges i tabell 17-4.

Resultaten från geokemi-, mikrob- och hydromodelleringsprojekten kommer att bidra till ökad förståelse av den miljö i vilken Kärnbränsleförvaret ska placeras.

Geokemiska processer studeras inom Linnéuniversitetets geokemiska forskargrupp, som ligger på Nova FoU-plattformen. Studier lokaliserade till Äspö, Laxemar och Forsmark har innefattat främst yt- och grundvatten /17-1, 17-2, 17-3, 17-4, 17-5/, men har nu utvecklats till att omfatta även geologi (sprickmineral) och biogeokemi (biologiska och organiska material). I nuläget består gruppen av en professor, en post-doc, en forskarassistent och tre doktorander.

Tabell 17-4. Exempel på projekt inom Nova FoU med koppling till Äspölaboratoriet.

Projekt	Organisation	Beskrivning
Forskarutbildning	Linnéuniversitetet	Linnéuniversitetets geokemiska forskargrupp vid Äspölaboratoriet.
Mikrober	Göteborgs universitet	Undersökning av geogasdriven biosfär i Äspölaboratoriet.
Mikrober II	Universitetet i Göttingen	Biomineralisering, biogeokemi och biodiversifiering med hjälp av studier av mikroorganismer i Äspö.
Kustnära modellering	KTH	Hydrologiska transportvägar och kustdynamik med integrering av transport- och omvandlingsprocesser i vatten från land till hav.
Alfagate	NeoSys AB	3D lokaliseringsystem av personer. Utveckling och anpassning av RFID-teknik, skapa en hårdvaruoberoende lösning och integrering med andra driftsystem på Äspö.
SAFESITE	NeoSys AB	Integrerat brandskydd. Brandlarm och säkerhet för slutförvaret, utveckling och anpassning av RFID-teknik.
EoS	Oskarshamn kommun	Låggradig spillvärme. Forskning och teknikutveckling för att ta tillvara spillvärme från industrin.

17.4 Andra metoder

SKB följer utvecklingen av andra metoder för att ta hand om använt kärnbränsle utöver KBS-3. Dessa andra metoder är separation och transmutation (avsnitt 27.1) och deponering i djupa borrhål (avsnitt 27.2).

18 Säkerhetsanalys

18.1 Inledning

Säkerhetsanalysen är det instrument som används för att bedöma om ett förvar för radioaktivt avfall uppfyller de myndighetskrav på långsiktig säkerhet som ställs på en sådan anläggning. I Sverige är det primära kravet formulerat som en riskgräns och en central del av säkerhetsanalysen består i att kvantitativt uppskatta den radiologiska risken förknippad med eventuella utsläpp från förvaret i fråga. Säkerhetsanalysen har också en viktig roll i att ge återkoppling till Fud-programmet genom att peka i) på områden där ökad kunskap skulle kunna leda till mer realistiska och därmed ofta mer gynnsamma utfall av analyserna samt ii) på möjliga förbättringar av utformningen av ett förvar.

För närvarande genomför SKB säkerhetsanalyser som stöd för ansökningarna om att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och för ansökningarna om en utbyggnad av det befintliga slutförvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall vid Forsmark (SFR).

All väsentlig utveckling av metodik för säkerhetsanalyser sker inom ramen för de två projekt där de nämnda analyserna genomförs. Fullständiga redovisningar av metoder och tillämpningar ges i rapporteringarna från projekten och i denna Fud-rapport ges därför bara en sammanfattande överblick. I avsnitten 18.2 och 18.3 redovisas frågor kring säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret respektive för SFR.

Arbetet kring den långsiktiga säkerheten för det planerade förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) behandlas i del II (Loma-programmet).

18.2 Metodik för analys av Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet

18.2.1 Metodik i SR-Can och granskning av denna

I säkerhetsanalysen SR-Can användes en metodik i tio steg /18-1/. Metodiken granskades av SKI och SSI inom ramen för samrådet med SKB under platsundersökningsskedet /18-2/. I sammanfattning fann de dåvarande myndigheterna följande, baserat på egna arbeten och rapporter från externt anlidade granskare

- ”SKB:s metodik för säkerhetsanalys är i huvudsak i överensstämmelse med myndigheternas föreskriftskrav, men delar av metodiken behöver vidareutvecklas inför en tillståndsansökan.
- SKB:s kvalitetssäkring av säkerhetsanalysen är otillräcklig i SR-Can.
- Inför tillståndsansökan behövs ett bättre kunskapsunderlag kring vissa kritiska processer med potentiellt stor påverkan på risken från slutförvaret, bland annat erosion av buffert i deponeringshål.
- SKB behöver styrka att det antagna initialtillståndet hos slutförvaret är realistiskt och uppnåeligt.
- Redovisningen av risken för tidiga utsläpp bör förstärkas.”

Dessa huvudsatser stämde väl överens med SKB:s egen syn på viktiga punkter i det återstående arbetet fram till ansökningarna; de flesta kommer till uttryck redan i SR-Can-rapporten.

SKI:s synpunkter på säkerhetsanalysmetodik i granskningen av Fud-program 2007 grundades till stor del på resultatet av myndigheternas gemensamma granskning av SR-Can. SKI sammanfattade synen på säkerhetsanalysen enligt följande:

- ”SKI konstaterar att SKB har utvecklat en metodik kring säkerhetsanalys med en lämplig utformning i förhållande till SKI:s och SSI:s föreskriftskrav. Denna slutsats baseras på SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av säkerhetsanalysen SR-Can.

- SKI liksom SSI anser att det är avgörande för programmets fortsatta utveckling att SKB på ett ändamålsenligt sätt återkopplar till behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser från de kritiska frågeställningar som identifierats vid granskningen av SR-Can.
- Det är av stor betydelse att SKB inför SR-Site höjer ambitionsnivån för kvalitetsarbetet i samband med säkerhetsanalys. SKI anser att samrådet mellan myndigheterna och SKB kunde användas till en fortsatt dialog för att undvika onödiga oklarheter kring metodikfrågor, tolkningar av föreskriftskrav och redovisningsformer.”

Program

All metodikutveckling för Kärnbränsleförvaret sker inom ramen för säkerhetsanalysprojektet SR-Site, som kommer att redovisas som en del av dokumentationen i ansökningarna för att bygga slutförvaret för använt kärnbränsle. Någon detaljerad redovisning av metodikutvecklingen ges därför inte här. Också behov av metodikutveckling efter inlämnandet av ansökningarna kommer att redovisas i SR-Site.

Metodiken i SR-Site bygger i stora delar på den för SR-Can och det är viktigt att konstatera att myndigheterna i granskningen av SR-Can fann, att metodiken har en lämplig utformning i förhållande till gällande föreskriftskrav.

För att omhänderta synpunkterna i granskningen av SR-Can har de dåvarande myndigheternas granskningsrapport systematiskt gått igenom och fler än 200 åtgärder för utveckling och förbättring identifierats. Dessa kommer att dokumenteras internt inom SKB inom ramen för projekt SR-Site. Vad gäller myndigheternas synpunkt i granskningen av Fud-program 2007, att SKB på ett ändamålsenligt sätt bör återkoppla till behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser från de kritiska frågeställningar som identifierats vid granskningen av SR-Can, hänvisas vad gäller processförståelse till relevanta övriga delar av detta Fud-program (bränsle, kapsel, buffert, berg, etc).

I samrådet med SSM har ett antal teman av relevans för SR-Site tagits upp, i enlighet med SKI:s granskningssynpunkt. Här har bland annat givits redovisningar av kvalitetsarbetet inom SR-Site, av metodiken för SR-Site samt av nya rön kring buffererosion.

18.3 Analys av SFR:s långsiktiga säkerhet

SKB har sedan Fud-program 2007 inkommit med två relevanta dokument relaterade till långsiktig säkerhet som granskats av SSM.

- säkerhetsredovisning för SFR, SAR-08, levererad i april 2008 /18-3/,
- komplettering av Fud-program 2007, levererad i april 2009 /18-4/.

De delar av granskningen av de två dokumenten som berör analysen av SFR:s långsiktiga säkerhet finns presenterade i efterföljande avsnitt, medan de delar av granskningen som berör forskning i huvudsak presenteras i kapitel 20 och 21.

Komplettering av Fud 2007 och resultat av dess granskning

I kompletteringen av Fud-program 2007 presenterade SKB en plan för fortsatt metodikarbete inom projekt SFR-utbyggnad, PSU. Då projektet sträcker sig fram till år 2013 innefattade även planen det tidsintervall som omfattas av detta Fud-program.

I myndighetens granskning avhandlades planen mycket översiktligt /18-5/.

SAR-08 och resultat av dess granskning

SKB lämnade i april 2008 in säkerhetsanalysen SAR-08 till SSM. Myndigheten granskade säkerhetsanalysen under åren 2008 och 2009 och kom i december 2009 med ett beslut i frågan /18-6/. SSM anser att:

”Myndigheten bedömer att den inlämnade redovisningen på ett bättre sätt analyserar och utvärderar den långsiktiga strålsäkerheten, jämfört med tidigare redovisningar. De beräkningsfall och scenarier som härleds och analyseras är strukturerade på ett sätt som uppfyller myndighetens krav och följer i stort de anvisningar som myndigheten har utfärdat. Detta underlättar bedömningen mot det föreskrivna riskkriterium, som gäller för de långsiktiga konsekvenserna vid slutförvaring av kärnavfall.”

SSM anser dock att den plan för förslutning av anläggningen som presenterats är undermålig och förelade SKB att:

”Senast den 30 april 2010 inkomma med en entydig och sammanhållen plan för de åtgärder som, i enlighet med gällande strålsäkerhetsvillkor, behöver vidtas vid förslutning av anläggningen.”

SKB har omhändertagit myndighetens föreläggande genom svar till SSM inom utsatt tid.

SSM förelade även SKB att, före 31 december 2013, komplettera säkerhetsredovisningen med:

- ”en redovisning av den förväntade barriärdegraderingen för förvardsdelen BMA som baseras på samtliga rimliga sannolika degraderingsprocesser,
- en känslighetsanalys av risken för och betydelsen av ändrade redoxförhållanden på förvarsdjup,
- en utförlig motivering av de antagna parameterfördelningarna kopplade till grundvattenflödet i förvaret och dess närhet samt en väl underbyggd diskussion om vilka modellvarianter som förkastas.”

Metodik i SAR-08

I SAR-08 användes en metodik som i stort motsvarar den tio-steps metodik som användes i SR-Can. Bland annat införde SKB i SAR-08 säkerhetsfunktioner som används för att identifiera de scenarier som analyseras i säkerhetsanalysen. Rörande metodik skriver SSM i granskningsrapporten /18-6/ att:

”Den nya säkerhetsanalysmetodiken för SAR-08, som påminner mycket om den som SKB utvecklade i SR-Can, baseras på olika väldefinierade steg så som: FEP-hantering, initialtillstånd, säkerhetsfunktioner, referensutveckling, val av scenarier, val av beräkningsfall, dos- och radionuklidtransportberäkningar, sammanvägning av risk, samt säkerhetsvärdering. SSM anser att denna metodik är ändamålsenlig och tydlig och anser att den skapar goda förutsättningar för att förmedla en tydlig bild av vilka förhållanden händelser och processer som påverkar förvarets långsiktiga strålsäkerhet. Användningen av grafiska hjälpmedel i SAR-08 så som interaktionsmatriser och informationsflödesdiagram bidrar till överskådligheten.”

SSM pekade i sin granskning på ett antal områden där säkerhetsanalysen bör förbättras. Myndigheten anser exempelvis att effekten av degradering av de pluggar som installeras för att minska vattenflödet i förvardsdelarna samt effekten av andra redoxförhållanden än de analyserade bör studeras vidare eller att argumentationen bör underbyggas bättre. Det kan därmed vara angeläget att se över de säkerhetsfunktioner som användes i SAR-08 och eventuellt komplettera dessa.

Myndigheten anser även att:

”Ett område som kan förbättras är dock redovisningen av hur identifierade förhållanden, händelser och processer har beaktats vid utvecklingen av de konceptuella beräkningsmodellerna.”

Vi planerar att förbättra redovisningen genom att använda mer strukturerade underlagsrapporter, exempelvis som de processrapporter som använts i de senaste säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret. En första indikation på hur detta kan komma att se ut visas i kapitel 20 och 21 där forsknings- och utredningsbehov för ett SFR-förvar presenteras på ett motsvarande processbaserat sätt som för Kärnbränsleförvaret.

Angående beräkningar och osäkerheter i data anser SSM:

”Beräkningsfallen ger överlag en bra bild av de händelser och processer som kan påverka förvarets långsiktiga strålsäkerhet. I vissa fall är beräkningarna dock inte ändamålsenligt strukturerade för att belysa säkerhetsbetydelsen i förhållande till kvarstående osäkerheter. Ett exempel är beräkningsfallen som ska illustrera betydelsen av degraderade barriärer (tidig degradering av barriärer samt extrem permafrost).”

Ytterligare arbete krävs därmed för att underbygga den argumentation som förs, dels i beskrivning, dels identifiering av scenarier. För de senaste säkerhetsanalyser som utförts för Kärnbränsleförvaret, exempelvis SR-Can, har osäkerheter i parametrar identifierats och analyserats i en särskild data-rapport.

Program

Metodikutveckling för analys av långsiktig säkerhet för SFR sker inom ramen för säkerhetsanalysprojektet. Projektet har till uppgift att ta fram en analys av den långsiktiga säkerheten för både den existerande anläggningen och för ett utbyggt SFR.

I kompletteringen av Fud-program 2007 återfinns en beskrivning av den metodik som avses användas inom utbyggnadsprojektets säkerhetsanalys. Där finns även en ny rapportstruktur presenterad. Planen är, jämfört med den som presenterades i kompletteringen, relativt oförändrad, men för fullständigheten sammanfattas rapportstrukturen nedan:

FEP-analys

I en FEP-rapport (Features Events Processes) sammanfattas alla egenskaper, händelser och processer av betydelse för förvarssystemet. Så långt som möjligt baseras FEP-rapporten på arbete som redan utförts inom SR-Can och SR-Site. Utifrån identifierade FEP tas processrapporter fram för olika systemdelar. Upplägget av processrapporterna presenteras nedan.

Processrapporter

En nödvändig del av en säkerhetsanalys är att redovisa förståelsen av de processer som kan ske i förvarssystemet. Denna processförståelse bygger bland annat på det forskningsarbete som bedrivs inom och utanför SKB och på de FEP som identifierats (se ovan). I SR-Can togs (och i SR-Site tas) processrapporter fram för olika delar av systemet enligt en fördefinierad mall. Motsvarande mall tas fram för säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR. För ansökningarna rörande ett utbyggt SFR kommer processrapporter att tas fram och dessa kommer att avhandla:

- geosfär,
- avfall,
- barriärsystem,
- klimat,
- biosfär och ytsystem.

Datarapport

I datarapporten kommer data som används i säkerhetsanalysen att presenteras och kvalificeras. Datarapporten för säkerhetsanalysen av ett utbyggt SFR kommer att följa ett liknande upplägg som datarapporten för SR-Can /18-7/ och SR-Site.

Radionuklidtransportberäkningar

Alla modeller som användes i SAR-08 har implementerats i en ny kod för radionuklidtransport.

Arbetet har fortsatt med en djupare känslighetsanalys än den som utfördes inom SAR-08. Inom ramen för arbetet med säkerhetsanalysen SR-Site, bedrivs en omfattande utveckling inom området biosfärmodellering. Detta innefattar insamling av plats specifika data samt utveckling av modeller och modelleringsverktyg. De modeller som används för säkerhetsanalysen av ett utbyggt SFR ska, där det är tillämpligt, vara baserade på de resultat som tagits fram inom SR-Site.

Förvarsutformning

Arbetet med utformning av förvaret bedrivs i samarbete mellan projektering, säkerhetsanalys och teknikutveckling. Vid dimensionering och teknikval beaktas förvarskomponenternas långtidsegenskaper. I arbetet ingår att utveckla dels tekniska barriärer (bentonit och betongkonstruktioner), dels tunnelåterfyllning och pluggning. Med tunnelåterfyllning avses ett material som används för att återfylla tunnlar och andra förvarsutrymmen.

Initialtillstånd

Arbetet med att ta fram beskrivningar av initialtillståndet kommer att ske i samarbete med andra delprojekt inom projekt SFR-utbyggnad (PSU).

Referensutveckling

Arbetet med att ta fram beskrivningar av referensutveckling för SFR kommer att utföras i samarbete med platsundersökningsprojektet. Detta arbete baseras i olika grad på motsvarande arbete som utförts inom SR-Site. Biosfärutvecklingen kan antas ske på ett nära identiskt sätt. Däremot kommer utvecklingen av barriärsystemen att skilja sig åt för säkerhetsanalysen av ett utbyggt SFR, jämfört med det KBS-3-förvar som SR-Site behandlar.

Säkerhetsfunktioner

Myndighetens syn på de säkerhetsfunktioner som användes i SAR-08 finns presenterade i föregående avsnitt och SKB tolkar myndighetens svar som att SSM är positiva till användandet av säkerhetsfunktioner. SKB avser att utveckla konceptet ytterligare.

Scenarieanalys

För att ta fram de scenarier som sedan analyserades i SAR-08, användes säkerhetsfunktioner i kombination med de krav på mänsklig påverkan, FHA, som ställs. Hur scenarieanalysen ska bedrivas inom säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR kommer att bestämmas under arbetets gång. Som nämns i föregående avsnitt, anser myndigheten att SKB hanterat scenarieval på ett acceptabelt sätt, men efterfrågar ytterligare scenarier i säkerhetsanalysen.

19 Klimatutveckling

I det tidsperspektiv som säkerheten studeras hos slutförvaren för använt kärnbränsle och för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), det vill säga 100 000-tals år och längre, har klimatet i Skandinavien varierat kraftigt. Klimat har skiftat från varma interglaciala förhållandena liknande det vi har i dag, till perioder med fulla istidsförhållanden. Även om klimatet *i sig* inte har stor direkt inverkan på förvarens funktion, kommer andra processer relaterade till framtida klimatvariationer sannolikt att ha en stor inverkan. Det gäller till exempel tillväxten av inlandsisar och permafrost samt förändringarna av havsytans nivå. Dessa processer påverkar i sin tur till exempel grundvattenflöde, grundvattenkemi och spänningar i jordskorpan vilka också är av vikt för förvarens funktion. Klimatet vid markytan påverkar dessutom biosfärens utveckling. Biosfären styr i sin tur till stor del människans aktiviteter, vilka ska kunna fortgå i landskapet utan att människan påverkas av närheten till slutförvaren.

Kunskap om klimat och klimatvariationer är därför av stor vikt i SKB:s säkerhetsanalyser för slutförvaren för radioaktivt avfall. Beskrivningarna av klimatutvecklingarna i SKB:s säkerhetsanalyser nedan, är huvudsakligen givna i relation till slutförvaret av använt kärnbränsle. Stora delar av dessa beskrivningar är dock relevanta även för andra typer av förvar. Där frågor specifikt rör SFR, anges detta särskilt.

19.1 Klimatutvecklingar i SKB:s säkerhetsanalyser

SKB:s klimatprogram har i dag två huvudsakliga syften, i) att bidra med information för att kunna välja, underbygga och motivera de klimatutvecklingar som används i säkerhetsanalyserna, och ii) tillhandahålla detaljerad information för beskrivningarna av olika klimattillstånd, som sedan kan användas inom andra delar av SKB:s forskningsprogram.

Liksom konstaterat i Fud-program 2007, är det i dag inte möjligt att förutsäga framtida klimat i de långa tidsperspektiv som analyseras i SKB:s säkerhetsanalyser. Trots det går det att uppskatta storleksordningarna av tänkbara framtida klimatförändringar, bland annat baserat på kunskap om naturliga historiska klimatvariationer och simuleringar av framtida klimat. Det är med andra ord möjligt att relativt väl beskriva inom vilka gränser det skandinaviska klimatet kan komma att variera, även i mycket långa tidsperspektiv. Inom dessa gränser kan vi identifiera vissa karakteristiska klimattillstånd (tempererat, periglacialt och glacialt klimattillstånd) som är av vikt för förvarens funktion. Liksom tidigare fokuserar vi därför våra forskningsinsatser inom klimatområdet på att identifiera och förstå förhållanden och processer inom dessa klimattillstånd. Om förvaret uppfyller säkerhetskraven givet de olika tänkbara klimattillstånden, samt under övergångar mellan dem, behöver man i analysen av förvarets säkerhet ta mindre hänsyn till den faktiska framtida klimatutvecklingen i tid och rum. Vid beskrivningar av möjliga framtida klimatförändringar är det viktigt att även behandla fall där mänsklig påverkan är inkluderad.

SKB:s angreppssätt att hantera den komplexa frågan kring framtida klimat innebär att först konstruera en referensutveckling. Den utgör ett exempel på hur klimattillstånden kan tänkas avlösa varandra under en framtida glacial cykel, det vill säga under de kommande cirka 100 000 åren. Referensutvecklingen utgörs av en upprepning av förhållanden som rekonstruerats för den senaste glaciala cykeln, inklusive istiden Weichsel. Referensutvecklingen ger processkunskap om hur de olika klimatrelaterade processerna (inlandsisar, permafrost, strandlinjeförskjutning) fungerar och samverkar.

Förutom att referensutvecklingen används vid analysen av den långsiktiga säkerheten, utgör den även en lämplig vetenskaplig utgångspunkt för en utökad analys av klimatets påverkan på förvaret. Baserat på referensutvecklingen, vår kunskap om möjliga klimatvariationer och vår kunskap om förvarens funktion och säkerhet, väljs ett antal övriga klimatutvecklingar ut på ett strukturerat sätt. Dessa fall täcker in alla tänkbara situationer där klimatrelaterade processer potentiellt skulle kunna ha en större påverkan på förvarets funktion, men som inte täcks av referensutvecklingen, exempelvis med tjockare inlandsisar eller djupare permafrost. Även för dessa fall beskrivs hur de olika klimatdomänerna avlöser varandra över tiden, samt hur parametrar som inlandsistjocklek, permafrostmängd och strandlinjeförskjutning varierar.

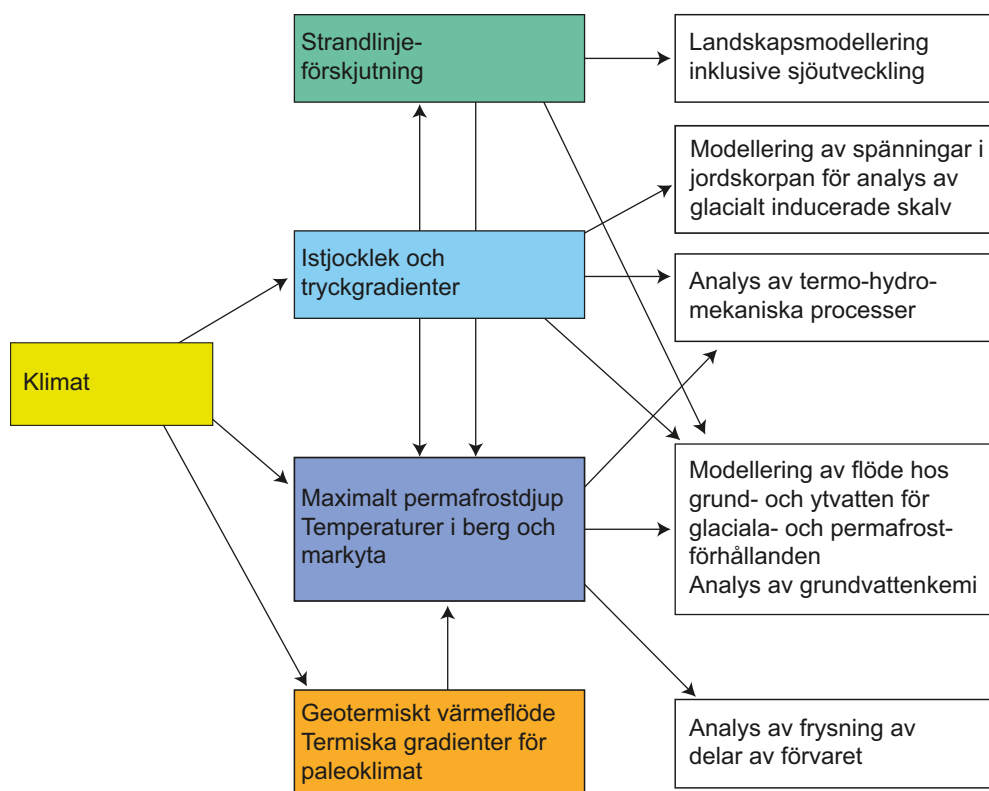
Eftersom det inte är möjligt att med tillräcklig säkerhet beskriva en *förväntad* klimatutveckling under de kommande 100 000 åren, ska de klimatutvecklingar som konstrueras inte ses som försök att förutsäga framtida klimat. De är i stället *relevanta exempel* på framtida utvecklingar som beskriver klimatrelaterade processer på ett realistiskt och integrerat sätt i ett 100 000-årsperspektiv.

De klimatutvecklingar som inkluderar en tydligt mänsklig påverkan, genom en ökad växthus-effekt, innefattar en global höjning av havsytan orsakad av en ökad avsmältning av framför allt den Grönländska inlandsisen och en termisk expansion av världshavens ytvatten. Att inkludera sådana klimatutvecklingar är nödvändigt med tanke på att Forsmark ligger i direkt anslutning till dagens kustlinje.

I referensutvecklingen är rekonstruktionen av inlandsisen under Weichsel viktig för hur de rådande klimattillstånden avlöser varandra. Rekonstruktion av Weichselisen, vars resultat beskrevs i Fud-program 2007, används i sin tur för att studera strandlinjeförskjutning (se avsnitt 19.3), permafrost (se avsnitt 19.4) och förekomst av glaciala skalv (se avsnitt 25.2.7).

För att öka förståelsen av den förändring och variabilitet som vi kan förvänta oss av klimatet i framtiden har SKB, i tillägg till tidigare studier rapporterade i Fud-program 2007, under den senaste treårsperioden även genomfört studier inom området klimatvariationer. Ett projekt har syftat till att studera extrema klimatsituationer i Sverige i ett 100 000-års tidsperspektiv, medan andra projekt har syftat till att studera klimatvariationer från geologiska klimatarkiv, och specifikt sammanställa paleoklimatologisk information för utvalda perioder under Weichsel, se avsnitt 19.2 och 19.5.

Med nuvarande angreppssätt och säkerhetsanalytiska metodik utgör de identifierade klimattillstånden – och deras utveckling i tid och rum i de utvalda klimatfallen – en bas för SKB:s säkerhetsanalyser. Klimatprogrammet utförs i nära samarbete med våra program för hydrogeologi, geokemi, biosfär, termo-hydro-mekaniska processer, buffert och kapsel, se figur 19-1.



Figur 19-1. Diagram som visar hur olika delar inom klimatprogrammet är kopplade till andra delar i säkerhetsanalysen SR-Site. Färgade rutor visar företeelser som studeras inom klimatprogrammet. Vita rutor visar andra aktiviteter inom SR-Site, där data från klimatprogrammet används. Pilarna anger huvudsakliga dataflöden i SR-Site.

Forskningsområdet kring framtida och historisk klimatutveckling är i dag mycket aktivt. Som komplement till den egna forskningen följer därför SKB fortlöpande aktuell forskning i internationella vetenskapliga tidskrifter, på vetenskapliga möten, samt arbetet inom organ eller organisationer som behandlar klimatfrågor.

19.2 Inlandsisdynamik och glacial hydrologi

Det glaciala klimattillståndet definieras som områden som täcks av glaciäris, det vill säga av glaciärer eller inlandsisar. De viktigaste forskningsområdena för detta klimattillstånd är inlandsisdynamik, glacial hydrologi och Weichsels glaciala historia.

En typisk kvartär glacial cykel omfattar en tidsperiod av omkring 100 000 år. Under de senaste glaciala perioderna dominerar hela Sverige av det glaciala klimattillståndet under de maximala skedena. Medelutbredningen hos inlandsisarna under kvartärperioden är dock betydligt mindre än så, i medeltal har områdena kring Forsmark och Oskarshamn med stor sannolikhet varit fria från inlandsis.

Inlandsisens termiska och hydrauliska egenskaper bestämmer hur isen påverkar sitt underlag (inklusive berg och grundvatten) och därmed också hur den påverkar ett slutförvar. Det glaciala smältvattnet är 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 förhållanden, se avsnitt 25.2.3, 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 bergspänningarna i det berörda området, vilket kan ge en reaktivering av befintliga sprickzoner i form av glaciala skalv, se avsnitt 25.2.7.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI uppskattade det sätt på vilket klimatfrågor integrerats i säkerhetsanalysen och ansåg att SKB gjort betydande framsteg i förståelsen av hur klimatförändringar påverkar ett slutförvar. SKI påpekade att frågan om glacial hydrologi behövde integreras bättre med övriga klimatfrågor, samt att skillnader i antaganden mellan beräkningarna för glacial hydrologi och inlandsisens utveckling behövde tydliggöras. SKI påpekade även att SKB bör hantera de osäkerheter som uppstår genom att de flesta processtudierna har gjorts på relativt små glaciärer, medan de flesta modelleringar gäller stora inlandsisar. SKI påpekade vidare att beräknade maximala istjocklekar i Laxemar och Forsmark är rimliga, men att SKB bör beskriva modellen bättre och de förenklingar den grundas på.

SKI påpekade vidare att SKB bör koppla insatserna att öka förståelsen av de hydrogeologiska förhållandena i och omkring en inlandsis till insatserna som relaterar till reaktivering av befintliga sprickor i berget (avsnitt 25.2.7). SKI påpekade att SKB ytterligare bör redovisa risken för och följden av glacial erosion vid båda kandidatområdena. SKI uppskattade SKB:s plan på att utnyttja den grönländska inlandsisen som en analogi för framtida glaciala förhållanden vid Forsmark. SKI saknade dock en referens till de förstudier som pågick på Grönland.

Kärnavfallsrådet skriver att inverkan av klimatförändringar på hydrogeologin behöver beaktas, samt att de olika klimatscenerierna bör beaktas när man modellerar övergången mellan geosfär och biosfär. Kärnavfallsrådet undrade hur och av vem SKB:s planerade studier av senaste glaciationen i Skandinavien ska göras, i och med att sådant arbete pågår redan på flera håll.

Inga synpunkter på klimatprogrammet återfinns i SSI:s granskning av Fud-program 2007.

I Fud-program 2007 redovisades en studie om en skattning av erosionsdjupet under kvartärtiden /19-1/. Studien uppskattar en övre gräns för den genomsnittliga erosionen av berggrunden under en glacial cykel eller enskild glaciation. Erosionsprocessen hade även utretts inom ramarna för SR-Can (Processrapporten), där aktuell litteratur inom området redovisas och slutsatser dras om påverkan på förvaret. SKI betonade att om betydande glacial erosion inte kan utslutas, bör detta beaktas vid överväganden kring lämpligt förvarsdjup för Kärnbränsleförvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

SKB beskriver i sitt klimatprogram dels en referensutveckling som innehåller en upprepning av förhållanden rekonstruerade för senaste glaciala cykeln, dels alternativa framtida klimatutvecklingar. De alternativa utvecklingar som utreds är:

- Ett kallare och torrare klimat än i referensutvecklingen, vilket resulterar i djupare permafrost och längre perioder med periglacial klimatdomän, se avsnitt 19.4. Flera alternativa utvecklingar behandlas.
- Ett kallare klimat med större nederbördsmängder som kan bygga upp en tjockare inlandsis eller is som ligger längre än i rekonstruktionen av den senaste glaciala cykeln, se nedan i detta avsnitt. Här utnyttjas även spår av andra nedisningar än den senaste. Flera alternativa utvecklingar behandlas.
- Ett framtida klimat dominerat av global uppvärmning, det vill säga varmare än under den senaste glaciala cykeln, se avsnitten 19.3 och 19.5. Flera alternativa utvecklingar behandlas.

Glacialgeologisk information

För att få en bättre underbyggd och mer detaljerad bild av referensutvecklingen, har flera studier av Weichsels glaciala historia genomförts. Studierna rör både inlandsisens rumsliga och tidsmässiga utbredning som beskrivs i detta avsnitt, samt kvantitativa klimatrekonstruktioner för utvalda tidsperioder, för att studera inom vilka gränser klimatet i Skandinavien varierade under senaste istiden, se avsnitt 19.5.

I september 2007 anordnade SKB en mindre internationell workshop med titeln *Fennoscandian paleoenvironment and ice sheet dynamics during MIS 3 /19-2/*. Ändamålet var att belysa kunskapsläget kring paleoförhållanden under en del av Mitt-Weichsel kallad Marina Isotopstadium 3 (MIS 3), en lång period som föregick senaste glaciala maximum. Ett av syftena med workshoppen var att ta fram ett nödvändigt underlag till de klimatmodelleringsstudier som redovisas i stycket Information från klimatmodeller i avsnitt 19.5. SKB har efter workshoppen tagit fram en specialvolym av tidskriften *Boreas* som, baserat på information presenterad på workshoppen, behandlar denna viktiga del av Weichselglaciationen /19-3/.

I de klimatsimuleringar som genomförts inom SKB:s klimatprogram, se avsnitt 19.5, har bland annat en period under MIS 3 studerats. För en sådan klimatsimulering behövs en föreskriven inlandsiskonfiguration för den aktuella perioden. Pollenstratigrafiska studier och dateringar av mammutrester och sedimentsekvenser har dock ofta givit disparata bilder av möjliga storlekar hos inlandsisen under MIS 3. För att kunna göra en väl underbyggd bedömning av Weichselisens konfiguration under den här perioden, bland annat som indata till klimatsimuleringen, genomfördes en studie där alla tillgängliga dateringar av interstadiala avlagringar från MIS 3 från Norge, Sverige, Danmark, Estland och Finland sammanställdes i en databas /19-4/. Detta är första gången en sådan sammanställning har gjorts där alla tillgängliga data noggrant och systematiskt bedöms med avseende på dateringarnas kvalitet. Resultatet visar bland annat att en möjlighet är att stora delar av Sverige var fria från inlandsis tidigt och under mitten av MIS 3.

Under den aktuella perioden har flera genomförda studier tillhandahållit glacialgeologisk information om Weichsel, av vikt för beskrivningen av referensutvecklingen /19-2, 19-4, 19-5, 19-6/. De genomförda studierna har, tillsammans med de studier som beskrivs i avsnittet 19.5, bidragit med information som gör att den klassiska bilden av Weichselnedisningen – med en mycket lång oavbruten period av inlandsis över Sverige från starten av Mitt-Weichsel för omkring 74 000 år sedan fram till deglaciationen för omkring 10 000 år sedan /19-7/ – behöver revideras. Den nya bilden av en mer dynamisk inlandsis, och därmed ett mer dynamiskt klimat, med isfria förhållanden i stora delar av Skandinavien och Sverige under MIS 3, styrks även av andra studier från den allmänna vetenskapliga litteraturen, sammanfattade i /19-2, 19-4, 19-5/. Resultat från /19-4/ har även publicerats i ett antal vetenskapliga artiklar /19-8, 19-9, 19-10/. I detta sammanhang är även de omfattande vetenskapliga artiklar som kommit ut från /19-5/ av relevans, redovisade i avsnitt 19.5. Resultaten som beskriver en mer dynamisk bild av inlandsisen, med isfria förhållanden under delar av Mitt-Weichsel, är samstämmig med den bild av inlandsisens utveckling som används i SKB:s referensutveckling, se figur 19-2.

Resultaten från studierna har minskat osäkerheterna i Weichsels glaciala historia och bidragit med viktig information om den långa och betydelsefulla MIS 3-perioden under Mitt-Weichsel. Det gör att säkerhetsanalysen har ett bättre underlag för referensutvecklingen baserad på en upprepning av Weichselglaciationen, och en bättre bild av den variabilitet som kan förekomma under en glaciation.

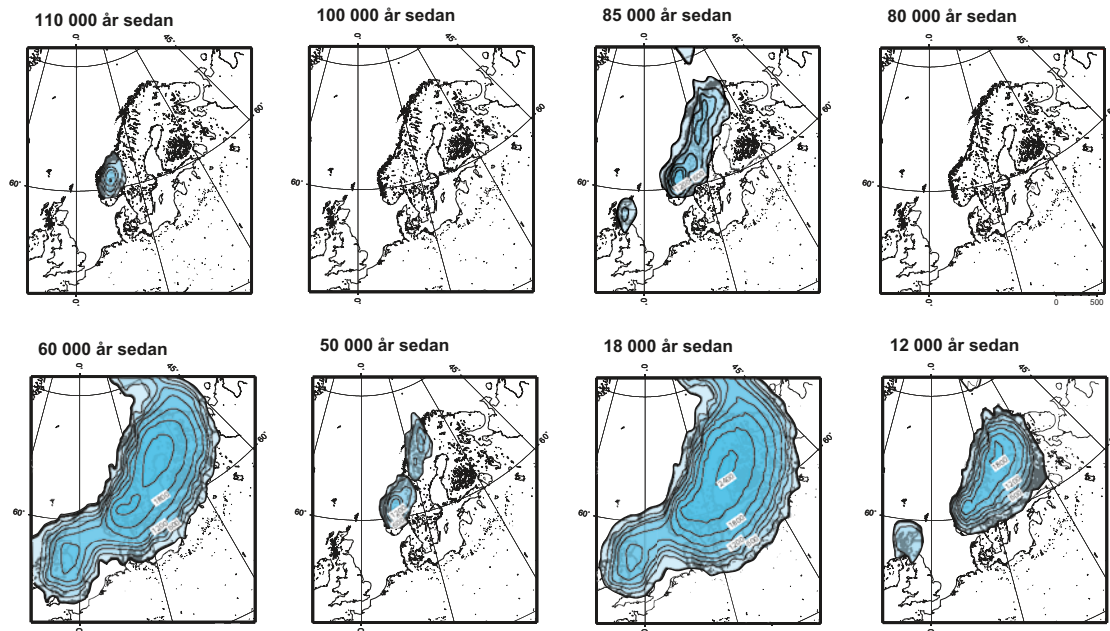
Kunskapen om isens konfiguration och utveckling för senaste glaciala maximumet för cirka 20 000 år sedan och för den efterföljande deglaciationen av Skandinavien, är sedan tidigare goda.

Numerisk inlandsissimulering

Den numeriska rekonstruktionen av inlandsisen under Weichsel (figur 19-2), vilken beskrevs i Fud-program 2007, används fortfarande för SKB:s referensutveckling. Även den metodik och de resultat som beskrev hur extrema klimat inom den glaciala domänen studeras, till exempel rörande maximala istjocklekar i Forsmark och Oskarshamn, är fortfarande aktuella i klimatprogrammet. Resultaten visade att den maximala förväntade istjockleken över platserna är 2 600 meter i Laxemar och 3 200 meter i Forsmark.

För att beskriva en referensutveckling där alla klimatrelaterade processer av vikt för förvarets funktion är inkluderade används, liksom tidigare, variationen i isutbredning och islasthistoria från inlandsrekonstruktionen (figur 19-2) som indata i de modellsimuleringarna av strandlinjeförskjutning och permafrost som ingår i referensutvecklingen, se avsnitt 19.3 respektive 19.4.

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 påverkas vid nedisningar. Den inlandsisutveckling som beskrivs i referensutvecklingen (figur 19-2) har använts som indata till en 3D-modellstudie av hur spänningarna i jordskorpan förändrats i Skandinavien under Weichsel och hur detta påverkar stabiliteten hos förkastningar /19-11/. Resultaten från studien beskrivs i avsnitt 25.2.7.



Figur 19-2. Exempel på iskonfigurationer och isytans nivå (300 meter ekvidistans) från den rekonstruktion av Weichselglaciationen som används i SKB:s referensutveckling. Värt att notera är bland annat att inlandsisens utbredning under den långa perioden kallad Marina Isotopstadium 3 (MIS 3) är mycket begränsad över Sverige. I figuren exemplifierad med en bild av isen för 50 000 år sedan, där man ser att områdena kring Forsmark och Laxemar är isfria. I motsats till den klassiska bilden av Weichselnedisningen, där hela Sverige är täckt av is från MIS 4 till slutet av MIS 2, tyder mycket ny information från SKB:s klimatprogram och från övrig forskning, på att en lång isfri period rådde under MIS 3. Studier av klimatet under en tidig och en sen del av MIS 3 beskrivs i avsnitt 19.5.

Processtudier av inlandsisars hydrologi

I tillägg till den tidigare sammanställningen av den teoretiska kunskapen om hur vatten flödar i och under en glaciär eller inlandsis, samt hur dessa kunskaper tillämpas i modellsimuleringar /19-12/, har en sammanställning av rumsliga och temporala variationer i glacial hydrologi genomförts /19-13/. Studien summerar omfattande observationer av glacialhydrologi och basala hydrologiska förhållanden från Storglaciären, norra Sverige, genomförda under perioden 1990 och 2006. Studien diskuterar även hur den här typen av observerade processer från små glaciärer kan användas som analogier för processerna vid inlandsisar.

En utmaning i sammanhanget är att vår kunskap kring glacialhydrologiska processer vid inlandsisar är bristfällig, samt att processerna i många fall är svåra att conceptualisera i dagens storskaliga inlandsismodeller. Den viktiga kopplingen mellan det komplexa glaciala hydrologiska systemet samt dynamiken och flödet hos inlandsisar saknas därför till stor del i dagens modeller. För att adressera dessa frågor har SKB, tillsammans med systerorganisationerna Posiva och NWMO (Nuclear Waste Management Organisation, Kanada), startat ett omfattande forskningsprojekt på västra Grönland (Greenland Analogue Project, GAP) för att studera bland annat hydrologiska processer vid en befintlig inlandsis, se avsnitt 19.6. Detta projekt kommer förhoppningsvis att bidra med information som gör att den omfattande glacialhydrologiska kunskap som finns från små glaciärer mycket lättare kan användas i resonemang på inlandsisskala.

De modellstudier av hydrogeologi under glaciala förhållanden som genomförts inom SKB:s hydrogeologiska program beskrivs i avsnitt 25.2.3. De hydrogeologiska modellstudierna och klimatprogrammet är integrerade med varandra genom att de hydrogeologiska modellkörningarna är uppsatta med data och antaganden baserade på kunskapen eller data framtagen inom klimatprogrammet (figur 19-1). Det kan gälla till exempel vilka isprofiler och associerade hydrostatiska gradienter som använts, eller hastigheten med vilken inlandsisen kommer eller går över modelldomänen. De hydrogeologiska simuleringarna behandlar även fall med permafrost och kombinerad permafrost-inlandsis, vilka också satts upp i direkt samarbete med klimatprogrammet.

Erosion

SKB bedriver sedan 2008 ett projekt som syftar till att beskriva och, i den mån det är möjligt kvantifiera, denudation (vittring och erosion) av markytan under långa tidsperspektiv (100 000 och en miljon år) i regionerna kring Forsmark och Oskarshamn. Metoden som används är studier av berggrundens långsiktiga morfologiska utveckling. SKB följer även aktuell litteratur inom området.

Program

Det vetenskapliga ämnesområde som beskriver hydrologin vid och under inlandsisar är i snabb framfart, både genom projektet GAP och olika övriga forskargrupper studier av hur den grönländska inlandsisen kan komma att reagera på ett varmare framtida klimat. Kunskapsläget för teorierna kring inlandsisdynamik och glacialhydrologi, som sammanställdes och avrapporterades i /19-14/, kommer därför att uppdateras i samband med SR-Site och senare igen inom ramen för säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR. Information om den basala hydrologin hos inlandsisar, till exempel hur den hydrauliska tryckbildningen varierar i olika rumsliga och tidsmässiga skalor, är av stor vikt vid uppsättningen av simuleringar av grundvattenflöde under glaciala förhållanden. Vi avser att arbeta vidare inom detta område med att studera hur den glaciala hydrologin kan och bör conceptualiseras i hydrogeologiska studier, se avsnitt 19.6 och 25.2.3. I detta sammanhang utgör projektet GAP en viktig del. Resultaten kommer att 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.

I anslutning till GAP avser SKB även att genomföra ett program kring inlandsismodellering, med fokus på konceptuella frågor om hur basala förhållanden och basal hydrologi hanteras i inlandsismodeller. Här kommer fältdata insamlade från studieområdet för GAP att användas (meteorologisk information om smältvattenproduktion på ytan, isrörelsedata, istjocklek, basala temperatur/hydrologiska förhållanden med mera). I tillägg till detta kommer den modell som användes för inlandsissimuleringar i SR-Can och SR-Site, och de antaganden som simuleringarna grundas på, att beskrivas mer i detalj inom ramen för SR-Site.

I samband med GAP planerar SKB även en studie med det specifika syftet att överföra den glacialhydrologiska kunskapen erhållen från GAP till skandinaviska förhållanden, inklusive projektdelar som behandlar området kring Forsmark.

Det projekt som SKB bedriver med syftet att beskriva och kvantifiera denudation av markytan under långa tidsperspektiv i områdena kring Forsmark och Oskarshamn, planeras slutföras år 2010. Vi kommer även att fortsätta bevaka litteraturen inom området.

19.3 Isostatiska förändringar och strandlinjeförskjutning

Strandlinjeförskjutning är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar 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 mycket vid bemärkelse, och inrymmer även alla tänkbara klimat i Sverige dominerade av global uppvärmning.

I säkerhetsanalysen SR-Site har beskrivningen av ett varmare framtida klimat, orsakat av en ökad växthuseffekt, breddats jämfört med tidigare. Nu behandlas två fall med olika lång tid av klimatpåverkan. I den första klimatutvecklingen utgörs de första cirka 60 000 åren vid Forsmark och Oskarshamn, liksom tidigare, av tempererat klimattillstånd. Därefter blir klimatet successivt kallare, med till en början korta, men med tiden allt längre, perioder av permafrost. I slutet av denna cirka 100 000 år långa period kommer den första perioden av glaciala förhållanden. I den andra klimatutvecklingen, dominerad av global uppvärmning, råder tempererat klimattillstånd under hela första 100 000-års perioden, det vill säga klimatet hoppar över en hel glacial cykel innan nästa glaciala period inleds.

I verkligheten skulle en utveckling hos ett klimat dominerat av global uppvärmning kunna medföra en initial period med tempererade klimatförhållanden som varar andra tider än i de valda fallen. Ett globalt varmare klimat skulle dessutom, åtminstone teoretiskt, kunna innebära att man regionalt över Skandinavien skulle kunna få ett svalare klimat än i dag, orsakat av omläggningar i den termohalina cirkulationen i Nordatlanten. Hanteringen av dessa komplexa frågeställningar fram till år 2006 beskrevs i /19-14/. Denna information kommer att uppdateras som en del av arbetet med SR-Site.

Kunskaperna är relativt goda om förhållanden och processer inom det tempererade klimattillståndet och deras betydelse för förvarets säkerhet och förhållanden i biosfären.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI och Kärnavfallsrådet påpekar att en eventuell framtida avsmältning av inlandsis på grund av global uppvärmning, och betydelsen av detta för slutförvaret, behöver redovisas i kommande säkerhetsanalyser, speciellt följderna av att grundvatten med högre salthalt tränger ner i Kärnbränsleförvaret på grund av höjd havsnivå. Kärnavfallsrådet finner föreslaget program för förfinade prognoser av havsytehöjning i ett varmare klimat utmärkt, och påpekar att SKB behöver överväga till exempel de problem som en högre havsnivå skulle medföra under slutförvarets byggtid. Kärnavfallsrådet skriver att inverkan av klimatförändringar på vattenkemi behöver beaktas.

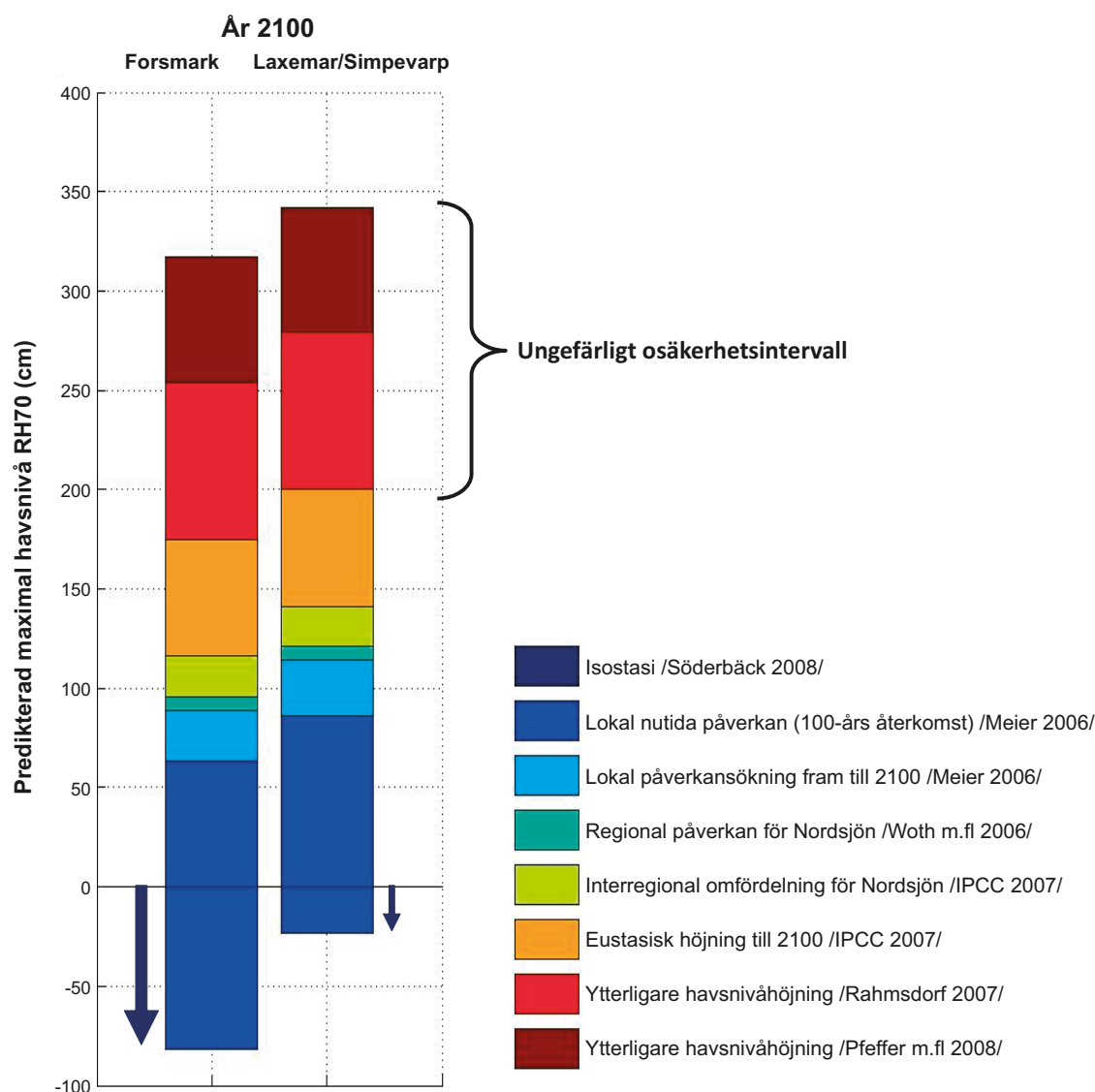
Nyvetenskap sedan Fud 2007

Nuvarande kunskapsläge för teorierna kring isostatiska förändringar och strandförskjutning har uppdaterats och rapporterats i /19-15, 19-16/. En mycket stor mängd information om framtida förändringar i havsnivå har även publicerats i den allmänna vetenskapliga litteraturen sedan Fud-program 2007. I tillägg till de två studierna ovan kommer det vetenskapliga kunskapsläget för isostatiska förändringar och havsnivåvariationer påverkade av global uppvärmning att uppdateras inom arbetet med SR-Site och säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR.

I en av de nya studierna /19-16/ beskrivs fysiken bakom Global Isostatic Adjustment (GIA), hur den påverkar havsnivåer och strandförskjutning, samt de metoder som används för att studera och förstå dessa processer. Studien ger en vetenskaplig bakgrund till processerna och metoderna som använts

i SKB:s GIA-simuleringar av strandlinjeförskjutning. Rapporten ger en mer fördjupad förståelse av GIA-processer än den som ges i /19-14/.

I en studie framtagen i ett samarbete mellan SKB:s biosfär- och klimatprogram, ges en bild av möjliga framtida förändringar i havsnivå vid Forsmark och Laxemar fram till år 2100 /19-17/. Studien, som huvudsakligen baseras på publicerad information, inkluderar processer som eustatiska förändringar (havsnivå), isostatiska förändringar (landhöjning) samt regionala och lokala extremer i vattenstånd i dag och för år 2100. Resultaten visar att det maximala vattenstånd som kortvarigt, vid stormtillfällen, skulle kunna råda år 2100, givet ett scenario för kraftig global havsyttehöjning, är drygt +2,5 meter för Forsmark och knappt tre meter för Laxemar-Simpevarp, se figur 19-3. Om ytterligare osäkerheter räknas in är värdet för båda platserna mer än +3 m. För en beskrivning av de olika uppskattningarna av möjliga extremnivåer i global havsyttehöjning, se /19-17/. Det är i sammanhanget viktigt att notera att detta vetenskapliga område är inne i en mycket intensiv fas, och revideringar av dessa siffror är att vänta.



Figur 19-3. Sammanställning av de komponenter som skulle kunna bidra till kortvariga extrema vattenstånd i Forsmark och Laxemar år 2100. Landhöjningen åskådliggörs som en nedåtriktad komponent. Ett grovt mått på osäkerheten hos de tre eustatiska komponenterna visas med en klammer ungefärligt centrerad vid det högsta värdet publicerat av Rahmsdorf /19-18/. För de referenser som används i figuren, se /19-17/.

Program

De GIA-simuleringar som användes för att beskriva strandlinjeförskjutning i SR-Can kommer i huvudsak att användas även i SR-Site. De kommer dock att kompletteras med ny information från publicerad vetenskaplig litteratur, framför allt med avseende på möjliga framtida havsyttehöjningar. Simuleringarna, som genomfördes i 2D, kommer även att kompletteras med viss information från tredimensionella GIA-simuleringar som inkluderar en lateralt varierande tjocklek på jordskorpan /19-16/.

Den vetenskapliga litteraturen kring framtida förändringar i havsnivå (orsaker, verkan och konsekvenser) kommer att växa kraftigt kommande år. SKB kommer därför att fortsätta att noggrant följa det här forskningsområdet, och i likhet med studien /19-17/ använda relevanta resultat för bedömningar av den inverkan som förändringar i strandlinje vid Forsmark skulle ha på ett Kärnbränsleförvar, både i kortare (fram till år 2100) och längre tidsperspektiv (flera 10 000-tals år).

Klimatutvecklingen med ett varmare klimat på grund av ökad växthuseffekt, med sin mycket långa initiala period av tempererade klimatförhållanden, bedömdes i SR-Can som huvudsakligen positivt för förvarets funktion. Det är troligt att en liknande bedömning kommer att göras inom SR-Site. Den påverkan som klimatutvecklingar dominerade av global uppvärmning kan komma att ha på grundvattenkemin hanteras inom ramen för SR-Site, se avsnitt 25.2.10.

19.4 Permafrost

Tillväxt och avsmältning av permafrost är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar inom det periglaciala klimattillståndet. I säkerhetsanalysernas referensutveckling råder periglacialt klimattillstånd med permafrost under stor del av tiden, i SR-Can under cirka en tredjedel av de kommande 120 000 åren /19-14/. Förekomst av permafrost påverkar kraftigt grundvattnets flödesmönster. Även grundvattnets sammansättning påverkas genom saltutfrysning.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI påpekar att SKB:s beräkningar av permafrost har osäkerheter i modeller och indata som inte redovisats på ett tydligt sätt, och att SKB bör redovisa följderna av att buffert och återfyllnad trots allt fryser. Kärnavfallsrådet anser att programmet för hantering av permafrost är bra, och att i synnerhet studier av frysning i återfyllnadsmaterialet är angelägna.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Detaljerade studier av permafrosttillväxt i Forsmarksområdet har genomförts under den aktuella Fud-perioden. Permafrostsimuleringarna i SR-Can genomfördes i 1D /19-14, avsnitt 3.4 och 4.4.1/. De kompletterande studierna för SR-Site görs i en nyutvecklad 2D-modell baserad på den tidigare 1D-modellen. Den 15 kilometer långa och 10 kilometer djupa profilen löper i den regionala topografins gradient, igenom det planerade Kärnbränsleförvaret. Detaljerade data från platsundersökningsprogrammet har använts som indata, till exempel på yttopografi, jordtäckets mäktighet och sammansättning, topografiskt fuktighetsindex (inklusive vegetationstyp), strandlinjeförskjutning och framtida sjöutveckling, bergdomäner och sprickzoners lägen och termiska, kemiska och hydrauliska egenskaper. Syftet med studien är att ge en realistisk bild av hur permafrost växer till i Forsmarksområdet, och i vilken mån den påverkar förvarets funktion. Resultaten används även för att sätta upp realistiska förhållanden avseende permafrost i hydrogeologiska studier av grundvattenflöde under periglaciala och glaciala förhållanden. I dessa studier genomförs dedikerade grundvattensimuleringar under förhållanden påverkade av permafrost eller permafrost kombinerat med inlandsis, se avsnitt 25.2.3. I studier där ämnesområdena klimat, geohydrologi och biosfär samarbetar, studeras även effekten av närvaron av potentiella framtida talikar (ofrusna områden i mark med permafrost) i Forsmarksområdet, se avsnitt 25.2.3 och 26.6.

Den nya permafrostmodellen hanterar även utfrysning av salt vid permafrosttillväxt, något som inte fanns med i SR-Can. Resultat som beskriver salinitet under och efter permafrostförhållanden planeras användas inom SR-Site.

Resultaten från permafroststudien demonstrerar hur den plats specifika utvecklingen går till när permafrost bildas och smälter av i Forsmarksområdet, givet den lokala topografin och markytans, bergets och grundvattnets lokala egenskaper. Resultat visar vidare, att givet liknande indata och uppsättning av modellen ger simuleringar med den nya förbättrade modellen maximala permafrostdjup som är väl i linje med de som presenterades i SR-Can. De preliminära resultaten indikerar, som väntat, att det är de rådande förhållandena vid markytan (temperatur, vegetation och snötäcke), som är de huvudsakliga styrande parametrarna för permafrostens rumsliga och tidsmässiga utbredning i Forsmark. Resultaten indikerar vidare att den flerdimensionella variationen i termiska egenskaper hos berget och den konvektiva värmetransporten enbart har en mindre påverkan på permafrosten, vilket stöder de antaganden som gjordes i SR-Cans 1D-permafrostsimuleringar och en vidare användning även av dessa resultat i SR-Site.

Omfattande känslighetsstudier på indata har genomförts med den nya permafrostmodellen, inklusive på den temperaturkurva som används för de tidstransienta simuleringarna. I likhet med tidigare analyseras referensutvecklingen, kompletterad av klimatfall mer gynnsamma för permafrosttillväxt. Osäkerheterna i indata, och deras konsekvenser för resultaten, kommer att beskrivas mer detaljerat än i permafroststudien för SR-Can.

I detta sammanhang ska också nämnas att buffertlerans egenskaper vid och efter frysning har studerats, se avsnitt 24.2.4.

SKB har även genomfört en studie där uppmätta borrhålstemperaturer från borrhål i Forsmark och Laxemar har jämförts med motsvarande *simulerade* temperaturprofiler (beräknade med hjälp av termisk konduktivitet, termisk diffusivitet, geotermiskt värmeflöde och antagna variationer i paleotemperatur) /19-19/. Syftet var, bland annat, att studera rådande marktemperaturer vid platserna och hur den påverkats av historiska klimatvariationer, och att beräkna värden för det geotermiska värmeflödet, korrigerat för en paleoklimatologisk inverkan. Resultaten visar att den marktemperatur som användes i SR-Cans permafrostsimuleringar, för dagens situation, förmodligen var något för låg. Bland annat med hjälp av resultat från denna studie har detta kunnat förbättras i SR-Sites permafrostsimuleringar, beskrivna ovan. Det beräknade geotermiska värmeflödet i Forsmark och Laxemar var 61 och 56 meterwatt per kvadratmeter (mW/m^2), med en osäkerhet på +12 procent och -14 procent för båda platserna /19-19/. Resultaten har använts som indata i de plats specifika simuleringarna av permafrost beskrivna ovan.

Program

Även om ämnesområdet permafrost inte ingår som ett dedikerat delprojekt i GAP, så är GAP:s program upplagt så att projektet bidrar med viktig information även inom detta område, se avsnitt 19.6. I regionen där GAP genomförs finns i dag omfattande permafrost i bergrunden framför inlandsisen. Observationer av till exempel salinitet i grundvattnet under permafrosten kommer att exemplifiera hur en geokemisk sammansättning av grundvattnet kan se ut i kristallin bergrund under dessa förhållanden. I samband med GAP planerar SKB att fortsätta delar av det pågående permafrostmodelleringsprogrammet.

För en ökad förståelse av de paleotemperaturer som rått vid Forsmark, planerar vi att eventuellt gå vidare med en mer detaljerad studie av något av de djupa borrhålen i området. Beräkningarna av temperaturkurvor för borrhålet /19-19/ skulle kunna förbättras genom att minska osäkerheterna i data på bergets termiska egenskaper, varefter mer detaljerad information skulle kunna erhållas vid en jämförelse mot uppmätta borrhålstemperaturer.

Flera av angreppssätten och metoderna som används inom klimatprogrammet för säkerhetsanalysen av Kärnbränsleförvaret är användbara också för säkerhetsanalyser av förvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR). Det finns dock i det här sammanhanget viktiga skillnader mellan de två förvaren: SFR ligger betydligt grundare och halveringstiderna för de radionuklider som ger dos är kortare. Hur detta påverkar giltigheten för SKB:s klimatutvecklingar (i SAR-08 användes klimatfallen från SR-Can) kommer att utredas vidare inom ramen för säkerhetsanalysen för utbyggnad av SFR. Inom ramen för denna säkerhetsanalys planerar vi även att utföra dedikerad permafrost/frysningssimuleringar anpassade till de speciella förutsättningarna och frågeställningarna som gäller för SFR.

I anslutning till projektet GAP, se avsnitt 19.6, planerar SKB att tillsammans med Posiva och NWMO genomföra studier av permafrost och dess betydelse för hydrologi och grundvattensammansättning.

19.5 Klimat och klimatvariationer

I tillägg till studierna av klimatrelaterade processer som sker vid inlandsis, permafrost och strandlinjeförskjutning beskrivna ovan, innehåller klimatprogrammet även studier av klimatet i sig. Syftet är dels att ge fylligare information och exempel på hur klimatet kan te sig inom de olika klimattillstånden, dels att ge en bättre bakgrund för uppskattningen av storleksordningarna av tänkbara framtida klimatförändringar. För detta ändamål använder sig SKB både av naturliga klimatarkiv och klimatmodeller.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI stöder SKB:s planerade projekt som syftar till att erhålla en mer nyanserad bild av klimatet i Skandinavien under en glacial cykel. Kärnavfallsrådet påpekar att det är viktigt att simulera den framtida klimatutvecklingen med en ökad halt av växthusgaser, och att SKB:s klimatforskning bör utvecklas efter tre olika tidsskalor: de närmaste 100 åren, de efterföljande 1 000 åren och de därpå kommande 100 000 åren.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

De två planerade projekten som beskrevs i Fud-program 2007, som syftade till att ge en mer nyanserad bild av klimatet i Skandinavien under en glacial cykel, har genomförts som planerat. En mycket stor mängd resultat har kommit fram inom respektive projekt, något som inte går att presentera i detta Fud-program. Huvuddelen av resultaten presenteras i de publikationer som anges i nedanstående summering i styckena Information från klimatarkiv och Information från klimatmodeller.

Den information som tas fram inom SKB:s klimatforskningsprogram är väl lämpad att användas för att beskriva klimat och klimatrelaterade processer för de tre tidsskalorna: närmaste 100, 1 000 och 100 000 åren.

Information från geologiska klimatarkiv

En paleoklimatologisk studie av en sedimentkärna från platsen Sokli i norra Finland /19-5/ fokuserar på den yngsta interstadialen under Weichsel, MIS 3, där isfria förhållanden på denna plats har daterats till cirka 50 000 BP (andra delar av studien beskrivs i avsnitt 19.2. Lokalen där sedimenten hämtats är unik för Skandinavien i och med att de äldsta sedimenten är omkring 130 000 år gamla och att sedimentation förekommit på platsen under mycket långa perioder fram till i dag. En omfattande rekonstruktion av förhållandena på platsen har genomförts baserad på en analys av ett stort antal olika proxydata. Resultaten har i många delar varit förvånande och ifrågasätter den klassiska bilden av den glaciala historien under Mitt-Weichsel. Resultaten visar att man i denna del av norra Skandinavien inte bara haft isfria förhållanden för runt 50 000 år sedan, utan att klimatet mitt under pågående istid var mycket varmt, med juli-medeltemperaturer lika varma som i dag (upp till $13 \pm 1,15$ °C). Det varma klimatet tros delvis kunna förklaras av större instrålning under sommaren på denna latitud än i dag.

Studier som visar på isfria varma förhållanden i en stor del av östra Fennoskandia för 50 000 år sedan (se /19-5/ och referenser i denna), bidrar med viktig paleoklimatologisk information som gör att vi bättre kan förstå inom vilka gränser klimatet naturligt kan variera under en glacial cykel. Resultaten är intressanta eftersom de visar att klimatet haft en mycket stor tidsmässig och amplitudmässig variabilitet under Weichsel. Liknande studier har aldrig tidigare genomförts så systematiskt och omfattande för någon lokal i Skandinavien vad gäller antalet olika proxydata och parametrar som analyserats. Studien har även publicerats i en rad vetenskapliga artiklar /19-20, 19-21, 19-22, 19-23, 19-24, 19-25, 19-26/. Den har också presenterats vid ett stort antal vetenskapliga konferenser /19-27, 19-28, 19-29, 19-30, 19-31, 19-32, 19-33, 19-34, 19-35, 19-36/.

Fler studier relevanta för ämnet klimat och klimatvariationer /19-4, 19-8, 19-9, 19-10/ har beskrivits i avsnitt 19.2.

Information från klimatmodeller

SKB har bedrivit och avslutat ett flerårigt klimatmodelleringsprojekt vars övergripande syfte var att beskriva extremer inom vilka klimatet kan variera på en 100 000-års tidsskala /19-37/. Baserat på den strålningsdrivning (eng. forcing conditions) som resulterat i extrema situationer under Weichsel, och tänkbara framtida förhållanden påverkade av antropogena utsläpp, har klimatsimuleringar genomförts för att undersöka och beskriva tre olika perioder;

1. en period med förmodat periglacialt klimat (kallt torrt) i slutet av MIS 3 (cirka 44 000 år sedan),
2. en period med nedisning (senaste glaciala maximat, LGM, för cirka 20 000 år sedan),
3. en framtida period dominerad av global uppvärmning (några tusen år in i framtiden).

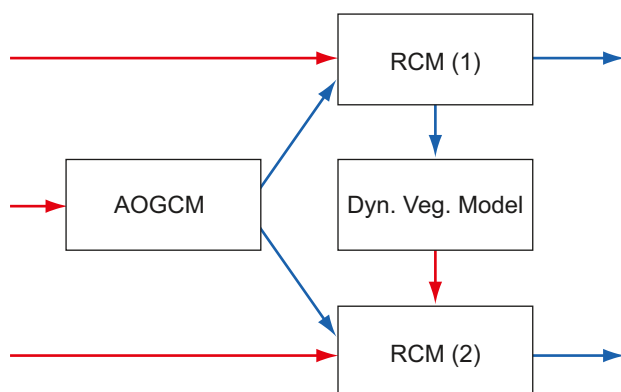
I samband med att det periglaciala fallet skulle sättas upp anordnade SKB en mindre internationell workshop /19-2/ för att utvärdera kunskapsläget kring parametrar som behöver definieras i klimatmodellen (isutbredning, havsnivå etc för den valda perioden under MIS 3. och bestämma hur dessa bäst skulle ansättas i klimatmodellerna.

Simuleringarna av de tre fallen genomfördes först med en global klimatmodell (CCSM3) varefter resultaten skalades ner i en regional klimatmodell (RCA3), se figur 19-4. Den regionala modellen producerade detaljerad information om klimatvariabler som lufttemperatur och nederbörd över Europa. Med syftet att erhålla bättre data genomfördes även vegetationssimuleringar i samband med de regionala klimatsimuleringarna, varvid vegetation och klimat fick påverka varandra (figur 19-4). För de tre perioderna extraherades sedan relevanta klimatdata ut från den regionala modellen för områdena kring Forsmark och Oskarshamn.

I tillägg till modelleringsdelarna i projektet lades vikt vid att sammanställa olika typer av proxydata på klimatparametrar för MIS 3 och LGM. Vissa av de paleoklimatologiska data användes till att gränssätta olika delar i modellernas uppsättning, medan andra paleoklimatdata användes för utvärdering av modellresultaten.

Resultaten vid jämförelsen mellan resultaten från de globala och regionala modellsimuleringarna med paleoklimatdata visar att modellresultaten huvudsakligen är i linje med proxydata /19-37/. De är också i linje med andra modellsimuleringar. De resulterande klimatet är också i kvalitativ samstämmighet med de föreskrivna inlandsisutbredningarna och typen av vegetation. Intressant är att resultaten från klimatsimuleringen för perioden under MIS 3 är konsistenta med de i förväg föreskrivna isfria förhållandena i södra och mellersta Sverige. Studien visar även att en modern klimatmodell, för denna sena del av MIS 3, genererar ett kallt och torrt klimat gynnsamt för permafrosttillväxt.

Alla genomförda simuleringar visar att det är en stor spännvidd i tänkbara klimat i ett 100 000-års-perspektiv, exemplifierat för Forsmark och Oskarshamn. Skillnaden i årsmedeltemperatur mellan simuleringen av ett periglacialt klimat och ett framtida klimat dominerat av global uppvärmning kan vara cirka 15 grader i Forsmarksområdet. Mängden nederbörd är omkring en faktor två så hög



Figur 19-4. Modellstrukturen som användes i /19-37/. AOGCM och RCM är den globala- respektive regionala klimatmodellen. Dyn. Veg. Model är vegetationsmodellen. Röda pilar symboliserar strålningsdrivning (eng. forcing conditions) och blå pilar visar simulerade klimat.

i det tempererade varma fuktiga klimatet jämfört med det periglaciala klimatet simulerat för slutet av MIS 3 (ej att förväxla med den varma perioden i början av MIS 3 studerad i /19-5/).

Delar av studien /19-37/ har publicerats i vetenskapliga artiklar /19-38, 19-39/. Resultaten har även presenterats vid ett flertal vetenskapliga konferenser /19-40, 19-41, 19-42, 19-43, 19-44, 19-45, 19-46/.

Resultaten från /19-37/ utgör ett mycket omfattande underlag som gör att det i detalj går att exemplifiera tänkbara klimatsituationer i den tempererade klimatdomänen dominerad av global uppvärmning och för den periglaciala klimatdomänen. Resultaten, i form av ett stort antal simulerade klimatparametrar på global, regional, och framför allt lokal skala (Forsmarks- respektive Oskarshamnsområdet), har gjorts tillgängliga och används både inom klimatprogrammet och inom andra forskningsprogram vid SKB, till exempel ytnära ekosystem, se kapitel 26.

Studierna av geologiska klimatarkiv och studierna med klimatmodeller bidrar med väsentlig information till beskrivningen av klimatets variabilitet och egenskaper i SKB:s säkerhetsanalyser. Studierna har bidragit till en ökad förståelse för de mer extrema klimatutvecklingarna som analyseras, samt till att undersöka realismen i dessa klimatfall.

Program

I linje med de glacialgeologiska och paleoklimatologiska studier som nu genomförts för Mitt-Weichsel /19-5, 19-4/, planerar SKB att studera motsvarande frågeställningar för en tidigare, och förmodat annorlunda, isfri period under tidig Weichsel samt för Holocen. Den sedimentkärna från norra Finland som i detalj analyserats för MIS 3 perioden under Mitt-Weichsel, planeras analyseras på samma sätt för interstadiala perioderna MIS 5c–d under tidig Weichsel. Syftet är att i likhet med den tidigare studien /19-5/ analysera och om möjligt kvantifiera klimatparametrar för dessa tidigare och förmodat annorlunda perioderna under Weichsel. Studien kommer att komplettera bilden av vilka klimat som rådde under den föregående glaciala cykeln och förbättra underlaget till beskrivningarna av tänkbara framtida klimat i SKB:s säkerhetsanalyser. I detta sammanhang planeras även en delstudie för att analysera den Holocena sekvensen från samma sedimentkärnor, dels för att vidare utvärdera de metoder som använts för rekonstruktionerna av klimat för Mitt-Weichsel /19-5/ och tidig Weichsel (planerad studie), dels för att studera Holocen klimatvariabilitet. För att ytterligare nyansera bilden av tänkbara framtida klimat, planerar vi även att eventuellt gå vidare med klimatmodellstudier för att komplettera studien i /19-37/.

19.6 Greenland Analogue Project (GAP)

För att öka förståelsen för hur klimatförändringar, och särskilt glaciationer, kan komma att påverka ett slutförvar på lång sikt har SKB tillsammans med Posiva och NWMO initierat ett projekt på västra Grönland, the Greenland Analogue Project (GAP), där en modern istidsanalogi studeras. De förväntade resultaten är av stor vikt för säkerhetsanalyser av både Kärnbränsleförvaret och för SFR.

Rekognoserade observationer genomfördes i fältområdet under år 2005, varefter GAP initierades 2008 med inledande fältundersökningar. Projektet planeras vara klart år 2013. Fältundersökningarna i projektet utförs på västra Grönland i ett område öster om orten Kangerlussuaq. Bergarterna i området uppvisar stora likheter med bergarterna i Forsmark. Likheten är en förutsättning för att studierna ska vara meningsfulla och ge önskad information om hydrologi, hydrokemi och permafrost i anslutning till en inlandsis.

Följande processer och övergripande frågeställningar studeras inom ramen för GAP:

1. Hur djupt ned i berggrunden kan glacialt smältvatten tränga ner?
2. Vilken kemisk sammansättning har smältvattnet om och när det når slutförvarsdjup (cirka 500 meter)?
3. Var under inlandsisen genereras smältvatten och grundvatten?
4. Hur stor del av det syresatta glaciala smältvattnet når förvarsdjup?
5. Hur ser trycksituationen ut under inlandsisen?
6. Kan talikar fungera som utsläppspunkter för djupt grundvatten?

Genom att använda den grönländska inlandsisen som en analogi för en framtida situation vid Forsmark med glacialt klimattillstånd, görs observationer som krävs för en integrerad och ökad konceptuell förståelse för hydrologiska och hydrogeokemiska processer vid glaciation. Målet med GAP är att ge en ökad processförståelse för att bättre kunna skapa konceptuella och numeriska modeller av grundvattenflöde, grundvattenkemi och de hydromekaniska kopplingarna under glaciala perioder. Ett mål är att kunskap från projektet ska kunna användas till att bättre bedöma graden pessimism i de antaganden som görs i dagens hydrogeologiska simuleringar, samt om möjligt minska graden av osäkerhet i dessa.

Följande organisationer och universitet deltar i GAP: University of Wyoming (USA), University of Montana (USA), Aberystwyth University (Storbritannien), Waterloo University (Kanada), Stockholms Universitet, Uppsala Universitet, GEUS (Danska och Grönländska geologiska undersökningen), GTK (Finska geologiska undersökningen), In2EarthModelling (Schweiz), TerraSolve (Sverige), Bergab (Sverige), SKB, Posiva och NWMO. Indirekt är även följande universitet med i projektet: Bristol University, Edinburgh University, Cambridge University, Swansea University, University of Washington, Princeton University och University of Indiana.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI ser med tillfredsställelse på SKB:s planer att utnyttja inlandsisen på Grönland som analogi för glaciala förhållanden vid Forsmark och Laxemar. Kärnavfallsrådet anser att det planerade Grönlandsprojektet är synnerligen angeläget, men att beskrivningen av projektet var väl diffus.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Omfattande undersökningar i fältområdet på Grönland i samband med GAP, har initierats och utförts sedan Fud-program 2007. Med hjälp av kärnbörningar och högupplösta temperaturprofileringar har kunskap erhållits om permafrostdjupet i området och de preliminära resultaten pekar på att det förmodligen finns aktiva talikar framför isen. Resultat från berggrunds- och sprickkartering samt geokemiska analyser av bergarterna i Kangerlussuaq-området visar att berggrunden till stora delar liknar berggrunden i Forsmark. Ett nätverk av GPS-stationer och automatiska väderstationer har placerats på inlandsisen i fältområdet och utifrån dessa stationer har en stor mängd isrörelsedata och meteorologiska data insamlats. Delar av bottenpografien under isen har studerats med hjälp av markradarundersökningar. Genom att kombinera dessa radardata med resultaten från ytundersökningarna på isen fås indirekt information om hur det subglaciala hydrologiska systemet fungerar.

SKB arrangerade en projektworkshop som hölls under hösten 2009 i anslutning till en GAP-modelleringsworkshop vilken fokuserade på inlandsismodellering och hydrogeologisk modellering. Resultat från GAP har presenterats vid ett antal konferenser /19-47, 19-48, 19-49, 19-50, 19-51/.

Program

GAP består av tre delprojekt (A–C) som arbetar mot specifika mål.

I delprojekt A studeras *indirekt* inlandsisens subglaciala hydrologi och grundvattenbildning genom glaciologiska och geofysikaliska undersökningar. Det finns ett täckande nätverk av kontinuerliga GPS-stationer för att mäta isrörelse och automatiska väderstationer för att ge data till beräkningar av vattenproduktion på ytan. Dessutom sker mätningar via till exempel markradar, smältbalansmonitering och seismiska undersökningar.

Delprojekt B syftar till att göra *direkta* observationer av subglaciala hydrauliska förhållanden (bland annat rumsliga och temporala variationer i vattentryck) med hjälp av hetvattenbörning genom inlandsisen och placering av tryckgivare i botten av isen.

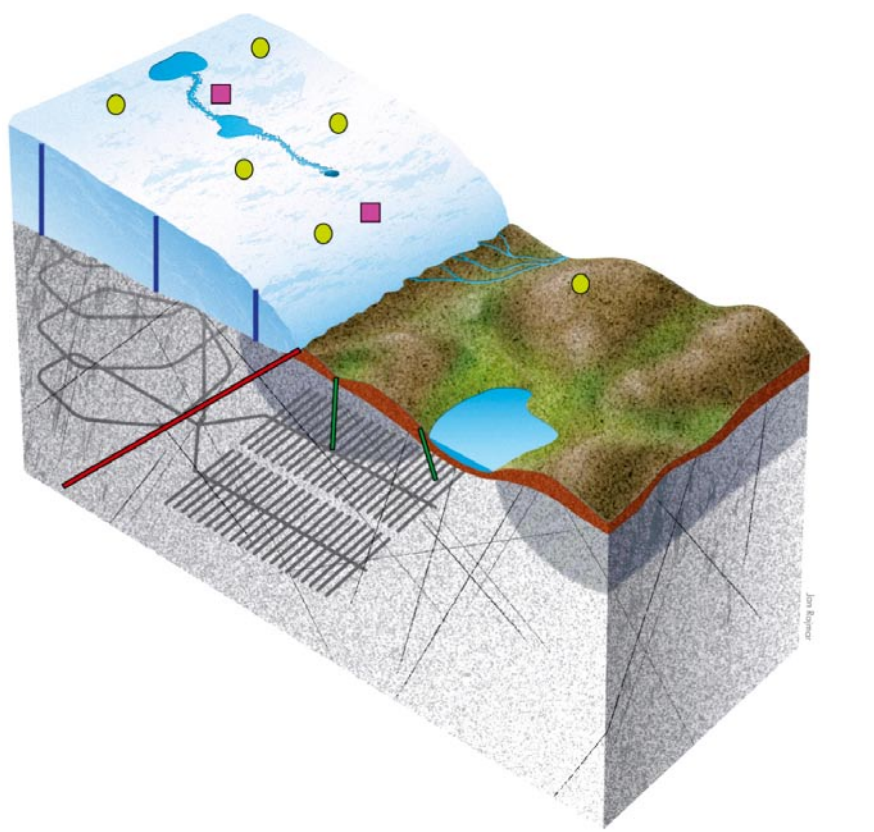
I delprojekt C studeras hydrogeokemin och hydrogeologin i berggrunden, i området utanför och under isen, med hjälp av bergbörningar och monitoringsprogram. Ett borrhål ned till motsvarande förvarsdjup planeras att borrar och instrumenteras. Även information om permafrosten i området erhålls från delprojekt C.

Figur 19-5 är en principskiss som illustrerar i vilka områden de olika delprojekten inom GAP utför undersökningar. Tabell 19-1 listar de olika data som samlas in i GAP, vilka används inom det inlandsis- och hydrogeologiska modelleringsarbetet som pågår inom men även parallellt med GAP.

För planering, effektivisering och för att koppla samman resultaten inom GAP så pågår ett ständigt samarbete mellan de tre delprojekten. Genom detta säkerställs även att slutresultaten från projektet blir en integrerad bild av inlandsishydrologi, geohydrologi, och geokemi inom studieområdet. Ett flertal ämnesområden inom SKB:s forskningsprogram har direkt eller indirekt nytta av resultaten från GAP: 1. hydrogeologi, beskrivningen av de hydrogeologiska förhållandena i och omkring en inlandsis (avsnitt 25.2.3); 2. geokemi, grundvattenkemiska förhållanden vid glaciation/permafrost (avsnitt 25.2.10); 3. termiska-, hydrologiska-, mekaniska processer (THM), kopplingar mellan mekaniska och hydrauliska processer i samband med glaciationer och permafrost (avsnitt 25.3.2) och 4. biosfär, biosfärens utveckling i en periglacial miljö (avsnitt 26.7).

Tabell 19-1. Data och information som erhålls inom GAP.

Delprojekt	Information/data
A	Isrörelsehastighet (GPS), förekomst av fritt vatten vid botten av inlandsisen, isdjup, bottenopografi (mark och flygradar), smältvattenproduktion (meteorologiska data), vattenflödes hastigheter (spårtester), tryck/utflöde/flödes hastigheter i supraglaciala sjöar, seismiska data, observationer av supraglacial hydrologi (fjärranalysdata)
B	Rumsliga och tidsmässiga variationer i vattentryck under inlandsisen (isborrning), borrhålsbilder (isborrning), isrörelsehastighet (GPS), subglacial topografi (lågfrekvent radar), vattenflödes hastigheter (spårtester), meteorologiska data
C	Berggrundsdata, strukturgeologiska data, geokemiska data inklusive isotopdata av berg- och ytgrundvatten, hydrogeologiska data (tryck, temperatur och konduktivitetsdata), mikrobanalyser, temperaturprofiler i borrhål



Figur 19-5. Principillustration över del av fältundersökningsområdet på Grönland. Skuggade mörkgrå områden motsvarar permafrost. Under den proglaciala sjön finns en ofrusen talik. Under inlandsisen finns ett tänkt slutförvar i Forsmark visualiserat. Gula cirklar är ett nätverk av kontinuerliga GPS-stationer och magentafärgade kvadrater är automatiska väderstationer för insamling av data till delprojekt A. De blå vertikala linjerna är tänkta borrhål för delprojekt B. Gröna linjer visar kärnborrhål borrade för att undersöka talikar och permafrosten inom delprojekt C. Det planerade djupa borrhålet visas av den röda linjen, snett ned under isen.

20 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

I detta kapitel beskrivs SKB:s naturvetenskapliga forskning rörande förvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Den forskning SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen kring hur de tekniska barriärerna i de olika förvarsdelarna i SFR degraderas under tidsperioden, 100 000 år, behandlas i kapitel 21. För den forskning som SKB bedriver för att öka förståelsen av geosfären och biosfären hänvisas till kapitel 25 och 26. Den forskning och utveckling som bedrivs av kärnkraftverken rörande avfall som ska deponeras i SFR presenteras i del II (Loma-programmet).

Slutsatser i granskningen av Fud 2007 och kompletteringen av Fud 2007

Kommentarer från myndigheten som gäller allmänna frågor rörande säkerhetsanalys av SFR tas upp i kapitel 18.

I granskningen av Fud-program 2007 anser SKI att SKB:s insatser för att kartlägga radionuklidinventariet i SFR är lovvärda. Framför allt SKB:s kartläggning av C-14, Ni-59 och Ni-63 i inventariet. SKI stödjer även SKB:s uppfattning att korrelationsfaktorer för vissa nuklider bör ersättas med andra metoder. SKI anser vidare att det är viktigt att SKB tar fram modeller för att analysera organiska komplexbildares inverkan på den långsiktiga säkerheten.

I granskningen av kompletteringen av Fud-program 2007 ser SSM positivt på de insatser som fortfarande genomförs för att förbättra kunskapen om radionuklidinnehållet i driftavfall från kärnkraftverken, särskilt vad det gäller den betydelsefulla radionukliden C-14. SSM påpekar vikten av att SKB:s arbete också omfattar undersökningar av innehållet av C-14 i avfall som har levererats från anläggningarna i Studsvik.

SSM ser också positivt på att SKB initierat ett projekt som syftar till att öka kunskapen om nedbrytningen av cement respektive betong under lång tid, med tanke på de långa tidsperspektiven som är aktuella för SKB:s slutförvarsanläggningar för låg- och medelaktivt avfall.

Säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet

Sedan Fud-program 2007 har arbetet med säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR strukturerats och därmed kan forskningen som beskrivs i detta Fud-program presenteras på liknande sätt som forskningen som rör säkerhetsanalysen SR-Site. I detta kapitel beskrivs därför forskningen kring avfallens initialtillstånd, som är startpunkten för säkerhetsanalysen, och de processer som förväntas påverka förvaret efter förslutning. Eftersom detta är det första Fud-program där forskningen kring kortlivat låg- och medelaktivt avfall beskrivs på detta sätt, ligger fokus på beskrivning av variabler och processer samt program, snarare än slutsatser och nyvunnen kunskap sedan Fud-program 2007.

20.1 Initialtillstånd i avfallet

För en beskrivning av avfallens uppkomst samt fördelningen av radionuklider i förvaret hänvisas till del II (Loma-programmet).

Initialtillståndet för SFR definieras som det tillstånd som råder i SFR vid förslutning. I samband med förslutningen kommer förvarets dränagepumpning att upphöra och förvaret kommer att vattenfyllas.

20.1.1 Variabler

Initialtillståndet är startpunkten för en säkerhetsanalys och beskrivs av de initiala värdena hos ett antal variabler, se tabell 20-1. Variablerna karakteriserar avfallet på ett lämpligt sätt för säkerhetsanalysen. Beskrivningen gäller inte bara själva avfallet utan även hålrummen som finns i avfallsbehållarna och mellan avfallsbehållarna samt de tekniska barriärerna dit vatten kommer att tränga in. I hålrummen kommer processer som advektion och blandning att äga rum. Variablerna definieras i tabell 20-1 och beskrivs i följande avsnitt.

Tabell 20-1. Variabler för avfallet i SFR.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Geometriska mått för samtliga avfallsbehållare.	20.1.2
Strålningsintensitet	Intensitet av alfa, beta, och gamma-strålning som funktion av tid och rum i avfallet.	20.1.3
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i avfallet.	20.1.4
Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor	Vatten- och gastryck i avfallet och avfallsbehållarnas hålrum samt vattenflöden från omgivningen som funktion av tid och rum.	20.1.5
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i avfallskollin.	20.1.6
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i avfallets olika delar.	20.1.7
Kemotoxiskt inventarium	Totalt inventarium av kemotoxiska substanser, inklusive bidrag från de tekniska barriärerna.	20.1.8
Materialsammansättning	De material som avfallets olika delar består av, exklusive radionuklider.	20.1.9
Vattensammansättning och vattenmättnad	Sammansättning av vatten och vattenhalt (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i avfallet och avfallets hålrum som funktion av tid och rum.	20.1.10
Gassammansättning	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i avfallet och i avfallets hålrum som funktion av tid och rum.	20.1.11

20.1.2 Geometri

SFR innehåller avfall av olika typer med olika geometrier. En geometriparameter utöver mått för avfallsbehållarna är voidvolymen det vill säga mängden hålrum som finns i avfallskollina. Om inte tomrummet som uppstår mellan avfallsbehållarna återfylls kommer även detta tomrum påverka advektionen och diffusionen i avfallet. Voidvolymerna i avfallet kan också ha betydelse för advektionen och diffusionen i avfallet.

Program

SKB kommer att utveckla modeller för voidvolymens inverkan på hydrovariabler. Voidvolymernas inverkan på nuklidtransporten och den långsiktiga säkerheten kommer att utredas.

Återfyllning kommer att studeras med hjälp av förbättrade radionuklidtransportmodeller, se avsnitt 21.3.

20.1.3 Strålningsintensitet

Strålningsintensiteten beror på inventariet av radionuklider och avfallets geometri. Strålningsintensiteten i avfallet som är deponerat i SFR är låg och har bedömts ha mindre påverkan på förvarets utveckling. Lokalt kan det förekomma avfallspaket med höga aktivitetsnivåer.

Program

Ytterligare beräkningar kan bli aktuella på grund av förändrat radionuklidinventarium, till exempel om beslut fattas för förvaring av reaktortankar i SFR. Om det visar sig att det kan bli aktuellt med slutförvaring av rivningsavfall med hög strålningsintensitet kan ytterligare beräkningar behövas.

20.1.4 Temperatur

Den initiala temperaturen i förvaret sätts av det omgivande bergets temperatur. Initialt förekommer inga värmealstrande processer i avfallet. Korrosion av aluminium sker inte initialt eftersom det deponerade aluminiumet är täckt av ett skyddande oxidskikt som bara löses upp under vattenfyllnad och högt pH /20-1/. Strålningsintensiteten av det avfall som finns deponerat i SFR är så pass låg att temperaturförändringar på grund av radioaktivt sönderfall är försumbart.

20.1.5 Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor

Hydrovariablerna är vattentryck och gstryck. Randvillkoren utgörs av vattenflödet från omgivningen.

Platsen för SFR valdes delvis för att den ligger i ett område med begränsad hydraulisk gradient och begränsad spricktransmissivitet. Placeringen av förvaret gjordes delvis med målsättningen att få låga vattenflöden genom de olika förvarsdelarna, vilka har konstruerats så att de har olika förmåga att begränsa vattenflödet (se avsnitt 21.1.7).

Vattenflöden förekommer inte vid deponering, eftersom förvaret dränagepumpas under driftskedet. När dränagepumpningen av förvaret upphör kommer tunnlarna att vattenfyllas och vattentrycket i det omgivande berget att öka. Vattentrycket driver flödet genom förvarsdelarna och dess omgivning. Vattentransport beskrivs i avsnitt 20.2.4.

20.1.6 Mekaniska spänningar

Stapling av avfallsbehållare utförs på ett sådant sätt att behållarna inte kollapsar av sin egen tyngd och/eller övergjutning. Expansion/kontraktion av avfallet (avsnitt 20.2.6), bergutfall (avsnitt 21.2.8) och voidvolymen har inverkan på mekaniska spänningar.

20.1.7 Totalt radionuklidinventarium

Vid förslutning av förvaret kommer det att innehålla radionuklider som uppkommer vid drift och rivning av kärnkraftverken samt mindre mängder från industri och forskning. SKB beräknar och följer ständigt utvecklingen av inventariet för att säkerställa att gällande villkor inte överskrids. Bestämning av innehållet sker delvis genom mätningar och beräkningar av årlig uppkommen aktivitet på kärnkraftverken och dels genom korrelation mot nyckelnuklider, Co-60, Cs-137 och Pu-239/240.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och granskningen av dessa

Både SSI och SKI och senare SSM ser positivt på SKB:s ansträngningar att kartlägga radionuklidinventariet i SFR.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

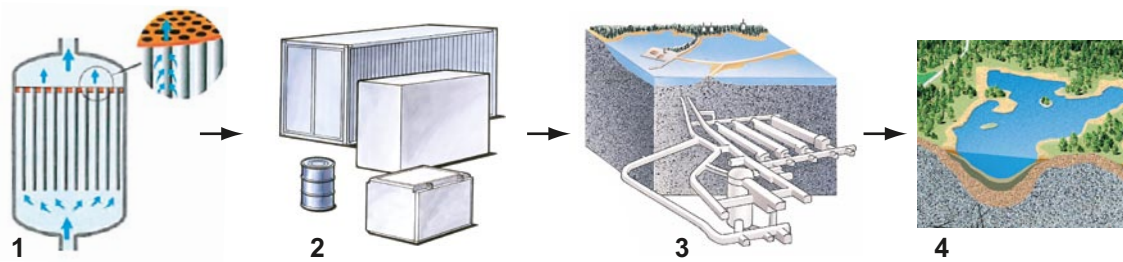
SKB:s program för att bättre bestämma radionuklidinventariet i SFR har fortsatt och ytterligare insatser har gjorts för att bättre bedöma inventariet av svårsmältbara nuklider såsom C-14. Vissa av de övriga så kallade svårsmältbara nukliderna, Cl-36, Ni-59, Ni-63, Mo-93, Tc-99, I-129 och Cs-135 bestäms nu årligen, baserat på driftförhållanden och provtagningar på kärnkraftverken. Vi utreder och sammanställer varje enskilt kärnkraftverks inventarium, som kan tänkas uppstå och deponeras i SFR till följd av att reaktorerna rivs.

Program

Ytterligare mätningar än de som redovisades i /20-2/ behövs för att få ett säkrare statistiskt underlag för deponerad aktivitet av C-14. I det utökade projektet analyseras kondensatreningsmassor från samtliga BWR-block samt driftjonbytomassor från samtliga PWR-block. Detta kommer att ge ytterligare information om deponerad aktivitet av C-14, i både organisk och oorganisk form, i SFR.

SKB har för avsikt att öka förståelsen kring C-14, inte bara i slutförvarsmiljön, utan även i andra delar av kedjan fram till biosfären. Figur 20-1 visar de områden där SKB bedriver verksamhet tillsammans med kärnkraftverken.

Eftersom det dominerande framtida dosbidraget i SAR-08 härrör från organiskt C-14 bedriver vi arbete för att öka förståelsen för hur detta organiska kol beter sig i kedjan från kärnkraftverk till biosfär.



Figur 20-1. Områden där SKB tillsammans med kärnkraftverken bedriver verksamhet för att öka förståelsen kring C-14. 1. Utökad analysprogram kring upptaget av C-14 på jonbytarmassor. 2. Utredningar kring faktiskt deponerad aktivitet av C-14. 3. Retardationen av C-14 innehållande specier i förvaret. 4. Konsekvenserna av C-14-utsläpp.

Parallellt med mät- och provtagningsprogrammet pågår arbete med att bestämma strukturen på organiska föreningar med C-14 som finns i jonbytarmassorna. Indikationer finns i litteraturen på att majoriteten av dessa föreningar som finns i vattnet eller jonbytarmassorna kan vara enkla organiska syror, så som ättiksyra och myrsyra /20-3/, 20-4/. Innehållet kan skilja sig åt mellan PWR och BWR, varför prover undersöks från både PWR och BWR reaktorer. Detta kan i förlängningen leda till att förståelsen ökar kring hur organiska föreningar innehållande C-14 uppkommer i kärnkraftverken och hur dessa föreningar påverkar den långsiktiga säkerheten för SFR.

Syftet med föregående och det nu pågående mät- och provtagningsprogrammet är att ta reda på hur mycket aktivitet av C-14 som tas upp av jonbytarmassorna i kondensatreningen respektive reaktorvattenreningen. Genom att produktionsraten av C-14 i reaktorvattnet för respektive block är känd /20-3/, och med kunskap kring hur mycket av det producerade C-14 som upptas på jonbytarmassorna, kan sedan aktiviteten av C-14 som deponeras beräknas. Detta förfarande kan vara något missvisande, eftersom en viss mängd C-14 förväntas att avgå vid konditioneringen av avfallet, främst vid FKA som torkar sina jonbytarmassor före bitumenkonditioneringen. Som ett led i att få en bättre uppfattning av vilken aktivitet av C-14 som verkligen deponeras i SFR av FKA, kommer SKB i samarbete med KTH och FKA att simulera konditioneringsprocessen för att på så sätt kunna mäta avgången av C-14 i processen. Det finns indikationer på att denna avgång är av betydelse vid temperaturer runt 150 °C. Dessutom kommer inverkan av tillsatt indunstarkoncentrat under torkningen av jonbytarmassorna att studeras med avseende på avgången av C-14.

Avfall med aska, tillhörande AB SVAFO som skickats till SFR från Studsvik, torde innehålla endast en begränsad mängd C-14. Prov från 1 200 askfat kommer att tas ut och analyseras med avseende på dess nuklidspecifika aktivitet. Resultatet från dessa analyser bör kunna ge en indikation över C-14-innehållet i befintligt avfall av liknande typ i SFR.

En avfallstyp som varit under utredning tidigare är de 95 lådorna med grafit från den nedlagda forskningsreaktorn R1. Detta avfall har ännu inte deponerats eftersom det innehåller relativt mycket C-14, och det inte anses möjligt att slutförvara detta avfall i BTF-förvaret i SFR.

Mängden C-14 som under åren 2002–2009 transporterats till och lagrats i Studsvik understiger 135 GBq. Verksamheten med IKA (icke kärntekniskt avfall) bedöms fortsätta som tidigare. Avfall med C-14 som Studsvik Nuclear AB tagit hand om före år 2002, har förbränts. Ingen utredning har gjorts om mängden C-14 i askan efter förbränningen. Resultaten från ovan beskrivna provtagningsprogram bör kunna ge en indikation om C-14 finns närvarande i askan.

I dag mellanlagras C-14 på Studsvik i fast och flytande form. Ingen konditionering har ännu skett av avfallet som tagits emot från år 2002.

Osäkerheten i aktiviteten hos det totala radionuklidinventariet, det vill säga aktiviteten hos samtliga radionuklider, påverkas bland annat av de indata som används för att beräkna inventariet och modellerna som används i beräkningarna. Ett ständigt arbete pågår tillsammans med kärnkraftverken för att minska osäkerheterna. Följande punkter har hittills identifierats som viktiga i den fortsatta utredningen av osäkerheter:

- För flertalet nuklider beräknas radionuklidaktiviteten i avfallet utifrån mätningar av till exempel ett avfallskollis gammaspektra. Beräkningarna bygger ofta på vissa antaganden, såsom kollits sammansättning. En inventering av osäkerheterna i mätmetoderna kommer att göras. En genomgång kommer att göras av hur antagandena kan påverka aktivitetsberäkningarna.
- För kortlivade nyckelnuklider kommer inverkan av osäkerheten i produktionsdatum på beräkningen av aktiviteten att undersökas.
- Aktiviteten hos flertalet radionuklider beräknas med korrelationsfaktorer från aktiviteten hos nyckelnuklider. En inventering av korrelationsfaktorerna kommer att göras för att uppskatta osäkerheten i storleken på korrelationsfaktorerna.
- Arbetet med att utveckla alternativa metoder till korrelation kommer att fortsätta med fokus på de nuklider som är avgörande för den långsiktiga säkerheten.
- Osäkerheten i de metoder som finns kommer att utvärderas och möjligheten att tillämpa nya metoder på historiska mätdata kommer att undersökas.
- I vissa fall kan endast den totala mängden av en viss nuklid som följer med avfallet bestämmas. För dessa nuklider kommer metoderna att beräkna fördelningen av aktiviteten mellan förvarsdelarna att vidareutvecklas.
- Inducerad aktivitet som sitter bunden i vissa material, till exempel aktivitet inducerad i reaktortankar, är inte tillgänglig för transport ut ur ett slutförvar förrän materialet brutits ned. En inventering av radionuklidernas tillgänglighet kommer att göras.
- Det finns avfall, till exempel jonbytmassor, som samlats upp i tankar under en längre tid. Osäkerheten i produktionsdatum är för detta avfall relativt stort, vilket kan medföra att osäkerheten i beräkningarna av aktiviteten för nuklider som korreleras mot Co-60 kan bli relativt stor. En utredning om hur man på bästa sätt beräknar nuklidinnehållet i detta avfall kommer att göras.

20.1.8 Kemotoxiskt inventarium

I SFR deponeras också ämnen med kemotoxiska egenskaper, till exempel mindre mängder epoxi, bly och asbest.

I och med att kärnkraftsreaktorerna rivs kan mängden av ämnen såsom asbest, bly och härdad epoxi komma att öka i förvaret. Mängden kemotoxiskt avfall från rivning ska uppskattas i de rivningsstudier som ska tas fram, se avsnitt 7.4.1

20.1.9 Materialsammansättning

En stor del av den aktivitet som finns i SFR, ligger i det så kallade våta avfallet. Det våta avfallet består huvudsakligen av kornformig jonbytmassa, pulverformig jonbytmassa, mekaniska filterhjälpmedel, indunstarkoncentrat och fällningsslam. Jonbytmassorna består av organiska polymerer, med inslag av sura eller basiska grupper, vilka ger katjon- respektive anjonbytande förmåga. I jonbytmassorna fastnar också icke radioaktivt material såsom organiska komplexbildare, till exempel citrat, glukonat och *N,N*-Bis(Karboxymetyl)glycin (NTA), samt olika katjoner, till exempel Fe(II)/Fe(III), Ni(II) och Zn(II).

Stora delar av det våta avfallet är konditionerat, det vill säga solidifierat i cement eller bitumen. Största volymen råavfall utgörs av brännbart fast avfall. Genom förbränning i Studsvik eller deponering lokalt vid de kärntekniska anläggningarna, blir den resterande volymen för deponering i SFR dock jämförelsevis liten. Råavfallet består huvudsakligen av cellulosa (papper, bomull och trä) och plast (till exempel polystyren, PVC, polyetylen och polypropylen).

En stor del av avfallsvolymen i SFR består av metaller, framför allt kolstål och rostfritt stål. Metallskrot uppkommer huvudsakligen under revisioner i samband med kassering, modifiering och renovering av utrustning. Stora metallkomponenter kan komma att deponeras i SFR i samband med rivning av reaktorerna. För stora metallkomponenter är korrosionshastigheten gränssättande för materialupplösningen.

Bland ytterligare material som förekommer i avfallet kan nämnas mineralull (som används för isolering), betong och tegel. Härutöver ingår ytterligare ett antal material och ämnen i mindre mängder.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Uppskattningar har gjorts över mängden rivningsavfall som kan komma att deponeras i SFR. Rivningsavfallet består främst av metall och betong som framgår av den rivningsstudie som är gjord för Barsebäcksverket /20-5/.

En litteraturstudie har utförts för att försöka kartlägga konsekvenserna av deponering av större mängder oxalsyra som härrör från BKAB:s dekontamination av de båda reaktorsystemen. De slutsatser som drogs av denna studie finns närmare beskrivna i avsnitt 20.2.10.

Program

SKB har startat ett program för att kvantifiera mängderna av icke radioaktiva katjoner som deponeras i SFR via jonbytarmassor från kondensatreningen och reaktorreningen i kärnkraftverken. Syftet är att få ökad förståelse kring framtida uttransport av radionuklider med efterföljande doskonsekvenser.

För att minimera mängden organiska komplexbildare i SFR – som främst tillförs SFR via rengöringsmedel som fastnar i jonbytarmassor – undersöker vi tillsammans med kraftverken möjligheterna att utveckla ett eget rengöringsmedel som inte innehåller några organiska komplexbildare, utan helt baseras på oorganiska komplexbildare som till exempel karbonat. Detta skulle kunna säkerställa att inga stora mängder organiska komplexbildare tillförs förvaret under fortsatt drift och därmed minimera risken för ökad löslighet av radionuklider. Karbonat är i sig en bra komplexbildare, men de höga halterna Ca(II) i cementmiljön kommer att dominera komplexbildningen av karbonat.

20.1.10 Vattensammansättning och vattenmättnad

Initialt är vattenmättnadsgraden i avfallet låg eftersom förvaret dränagepumpas under driftskedet. Vatten kommer att tränga in i förvaret vid förslutning, då dränagepumpningen upphör. Det grundvatten som tränger in i förvaret kommer via olika processer att påverkas av materialen i förvaret. Vattnets sammansättning kommer även att påverkas av vattenströmningen genom förvaret, där atten med olika sammansättning blandas.

Det grundvatten som kommer att strömma in i förvaret efter förslutning kan karakteriseras som ett salt grundvatten. Referenssammansättningen på det inträngande salta grundvattnet efter uppmättnad av förvaret ges i tabell 20-2 /20-6/. Basen för den antagna referenssammansättningen på grundvattnet är mätningar gjorda under byggnationen av SFR 1 (1984–1986), data från kontrollprogrammet för SFR 1 (1989–1999) samt geokemiska beräkningar /20-7/. I de geokemiska beräkningarna anpassades vattensammansättningen så att vattnet är i termodynamisk jämvikt med allmänt förekommande mineral i berget. Vid beräkning av betongdegradering anpassades innehållet av kalcium, magnesium och kisel för att vattnet ska stå i jämvikt med kalcit, dolomit och kvarts /20-6/.

En hydrogeologisk modell har använts för att beräkna hur lång tid det tar att fylla och mätta förvaret med grundvatten /20-8/. Beräkningarna visar att tomrummet (porositeten) som finns inuti silo-förvaret mätas sist och att detta kan ta 25 år. Tiden det tar att fullständigt mätta BMA, BLA och BTF är endast några få år.

20.1.11 Gassammansättning

Den initiala gassammansättningen kommer att styras av den mikrobiella aktiviteten som kan tillskrivas SFR under driftskedet. Fullskale-experiment i Olkiluoto (Finland) har visat att anaeroba förhållanden bildas relativt snabbt och nedbrytning av organiskt material (cellulosa) leder till nämnvärda halter av bland annat metan och koldioxid /20-9/. Den bildade gasen kommer att diffundera ut ur avfallet och bortforslas från förvaret via ventilationssystemen.

När förvaret vattenfyllts påbörjas de processer som kan leda till ytterligare gasbildning, till exempel korrosion (avsnitt 20.2.12), mikrobiell aktivitet (avsnitt 20.2.16) och radiolytisk degradering (avsnitt 20.2.17)

Tabell 20-2. Sammansättning på inträngande salt grundvatten efter uppmättnad av förvaret. Baserat på mätdata från SFR och geokemiska beräkningar (jonkoncentrationer i [mg/l]) /20-6/.

Parameter	Referensvärde	Minvärde	Maxvärde
Redox [mV]	Reducerande	-100	-400
pH	7,3	6,5	7,8
SO ₄ ²⁻	500	20	600
Cl ⁻	5 000	3 000	6 000
Na ⁺	2 500	1 000	2 600
K ⁺	20	6	30
Ca ²⁺	430	200	1 600
Mg ²⁺	270	100	300
HCO ₃ ⁻ (alk)	100	40	110
Si som SiO ₂ (aq)	5,66	-	-
Jonbalans i %	-0,04 %		

20.2 Processer

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet i avfallet och i dess hålrum. Vissa sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga när vatten trängt in i avfallet eller anaeroba förhållanden råder.

20.2.1 Översikt av processer

De processer som påverkar förhållandena i avfallet kan delas in i fyra olika huvudklasser: termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska. Under varje huvudklass kan ett antal olika processer förekomma och dessa kan växelverka med varandra och påverka eller påverkas av andra processer som förekommer i avfallet.

Termiska processer

Det finns få värmealstrande processer i SFR. Korrosion av aluminium skulle kunna vara ett tänkbart undantag, men har visats vara utan betydelse /20-1/. Värmetransporten kan väsentligen förväntas ske genom värmeledning som styrs av materialens värmeledningsförmåga och värmekapacitet. I allt väsentligt kommer förvarets och därmed avfallets temperatur att bestämmas av värmeutbytet med omgivande berg och grundvatten. Avfallets inverkan på temperaturen är försumbar. Temperaturen inverkan på avfallsbehållare av betong och cementkringjutet avfall är ej försumbar och frysning förändrar betongens integritet /20-10/. Frysning är den process som bedöms påverka den termiska utvecklingen av avfallet, se avsnitt 20.2.2.

Hydrauliska processer

Vattenflödet genom förvaret och avfallet bestäms av vattengenomsläppligheten i de olika konstruktionsdelarna och komponenterna i förvaret samt av den hydrauliska gradienten. Vattenflödena genom de olika förvarsdelarna är så pass låga (två centimeter per år) /20-8/ att erosionen av de olika avfallsbehållarna kommer att vara försumbar jämfört med den kemiska degraderingen. Om det samtidigt förekommer gas, uppstår ett tvåfasflöde där både vattenflödet och gasflödet påverkas av den relativa mätnadsgraden av respektive fas. Tvåfasflöde kan ha betydelse vid analys av gasflöden, men kan försummas vid analys av vattenmättnaden av förvaret efter förslutning, eftersom förvaret vattenmättas mycket snabbt /20-8/. Höga gasöverttryck av innesluten gas kan ge ett lokalt förhöjt vattentryck och kan därför bli en drivkraft för vattenflödet ut ur dessa inneslutningar. Koncentrationsgradienter kan även orsaka vattenflöde via osmos, men processen saknar betydelse utom för beskrivningen av nedbrytningen av bitumen. Storleken av vattenflödet i förvaret bestäms i hög grad av det omgivande grundvattenflödet. Följande hydrauliska processer behandlas:

- Vattenuptag i jonbytare och avfallsmatris, se avsnitt 20.2.3.
- Vattentransport, se avsnitt 20.2.4.
- Tvåfasflöde/gastransport, se avsnitt 20.2.5.

Mekaniska processer

Avfallet i de olika förvarsdelarna kommer att utsättas för extern mekanisk påverkan och interna volymsförändringar. Det påverkar spänningsfördelningen i avfallet, vilket i sin tur kan leda till uppsprickning och sprickbildning. Om det genereras gas som inte kan transporteras vidare, kan detta leda till tryck- och spänningsuppbyggnad. Slutligen kommer avfallet att påverkas av eventuella deformationer i berget (nedfallande block, berg rörelser, jordskalv med mera). Följande mekaniska processer behandlas:

- Expansion/kontraktion av avfallet, se avsnitt 20.2.6.
- Sprickbildning, se avsnitt 20.2.7.
- Bergutfall, se avsnitt 20.2.8.

Kemiska processer

Egenskaperna hos olika avfallsformer och avfallsbehållare påverkas av flera kemiska processer som omkristallisation, vattenupptag, kemisk och mikrobiell nedbrytning, korrosion av metaller, lösning/fällning samt bildande av olika korrosionsprodukter med gasutveckling som följd. Vattnets sammansättning förändras på grund av advektion och blandning. Koncentrationsskillnader utjämnas via diffusion. Sorptionen av radionuklider påverkas till största delen av vattensammansättningen i förvaret. Halten av ämnen som förekommer i små mängder, till exempel komplexbildare kan ha en stor inverkan på sorptionen av katjoner som finns lösta i vattnet. Den mikrobiologiska aktiviteten i förvaret bestäms i första hand av tillgången på organiskt material i förvaret, vilket påverkas av grundvattenflödet /20-11/. Följande kemiska processer behandlas:

- Upplösning/utfällning, se avsnitt 20.2.9.
- Degradering av organiska ämnen, se avsnitt 20.2.10.
- Speciering, se avsnitt 20.2.11.
- Korrosion, se avsnitt 20.2.12.
- Diffusion, se avsnitt 20.2.13.
- Advektion och blandning, se avsnitt 20.2.14.
- Kolloidbildning/kolloidtransport, se avsnitt 20.2.15.
- Mikrobiell aktivitet, se avsnitt 20.2.16.
- Radiolytisk degradering, se avsnitt 20.2.17.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i avfallet. Processernas växelverkan med varandra diskuteras inte här, utan kommer att beskrivas i den processrapport som ska författas som underlagsrapport till säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet.

20.2.2 Frysning

Avfallsbehållare av betong och cementkringjutet avfall anses bete sig på samma sätt vid frysning som de tekniska barriärerna. Denna process beskrivs i avsnitt 21.2.3.

20.2.3 Vattenupptag i jonbytare och avfallsmatris

När avfallet, framför allt jonbytarmassor, tar upp vatten ökar de i volym och hela avfallsmatrisen sväller. Med ökad vattenhalt startar de processer som leder till att vattensammansättningen ändras. Ökad vattenhalt möjliggör de processer som leder till transport av ämnen från förvaret.

Vattenupptag i en bitumenmatris sker genom diffusion in mot jonbytarmassor och salt i indunstarkoncentrat som är hygroskopiska. Konsekvensen av detta kan vara att det öppnas upp en sammanbunden porositet i bitumenmatrisen och att matrisen spricker på grund av de spänningar som svällningen ger upphov till. Hur fort vatten tas upp beror till stor del på andelen jonbytarmassa i matrisen. Den låga andelen jonbytarmassa i bitumen i SFR antyder ett långsamt vattenupptag. För ett fåtal avfallstyper med högre andel jonbytarmassa, kan det dock inte helt uteslutas att vattenupptaget sker relativt snabbt /20-12/.

Den svällning av bitumenmatrisen som sker vid ett vattenupptag kan också påverka omgivande barriärer om inte tillräckligt med expansionsvolym finns tillgänglig. En beräkning av den teoretiskt maximala svällningen antyder att volymökningen kan vara större än tomvolymen inuti avfallskollit för vissa avfallstyper i siloförvaret och BMA /20-12/. I BMA finns dock ytterligare tomvolymer utanför avfallskollina, om ingen kringgjutning sker.

Den huvudsakliga degraderingen av bitumenmatriser som leder till frigörelse av radionuklider i avfallet, förväntas vara vattenupptag och svällning. Tiden för vattenupptag och hur detta påverkar matrisen är dock väldigt osäker. En viss indikation på hur effektiv en bitumenmatris är som barriär för radionuklider kan erhållas från lakexperiment. Extrapolation av resultat från sådana lakförsök, utförda under i dessa sammanhang korta tider, indikerar att det skulle kunna ta flera tusen år innan alla radionuklider har lakats ut från bitumenmatrisen i ett 200-liters plåtfat /20-12/. De långsiktiga materialförändringar som orsakas av bland annat vattenupptag kommer dock troligtvis möjliggöra frigörelsen av radionuklider från bitumenmatrisen snabbare än vad lakexperimenten indikerar. En mer rimlig tidsskala för frigörelsen av radionuklider från bitumensolidifierat avfall är i storleksordningen flera hundra upp till tusen år /20-12/.

Vattenupptaget i cementmatriser förväntas ske snabbare än i bitumenmatriser och cementen i det cementsolidifierade avfallet i silon förväntas vara vattenmättat inom 25 år från förslutning /20-13, 20-8 /, se avsnitt 20.1.10. De förändringar som sker i avfallets betongmatris beskrivs i avsnitt 21.2.10.

Vattenupptaget för avfallsmatriser i betongkokiller styrs av betongens vattengenomsläpplighet som beror på betongens egenskaper och hydrauliska tryckgradienter.

20.2.4 Vattentransport

Vattentrycksgradienten i avfallet ger upphov till tryckinducerat flöde. I allmänhet kan inte avfallspaketet absorbera allt vatten som tränger in i förvaret, varför ett vattenövertryck bildas. Vattentrycket driver flödet genom avfallet. Flödets storlek bestäms av geometri och konduktiviteten hos avfallspaketet och återfyllnadsmaterialet.

Storleken, riktningen och fördelningen av vattenflödet i olika delar av förvarssystemet och geosfären påverkar transporten av radionuklider. Även transport av andra specier, mikroorganismer och bakterier styrs av vattenflödet. Bergutfall och återfyllning har inverkan på vattenflödet.

Program

Hydrogeologiska beräkningar planeras för att kvantifiera förväntade vattenflöden i förvarets olika delar och för att analysera vattenflödet från förvaret till det ytnära ekosystemet. Programmet för det senare beskrivs i avsnitt 25.2.3 och avsnitt 26.6. Programmet för modelleringar av vattenflöden genom förvaret beskrivs i avsnitt 21.3.

20.2.5 Tvåfasflöde/gastransport

Se avsnitt 21.2.5.

20.2.6 Expansion/kontraktion av avfallet

Tidigare analyser av förhållandena i SFR har visat att den mängd sulfat som erhålls vid fullständig nedbrytning av all jonbytmassa i siloförvaret och den volymökning som detta leder till då sulfat reagerar med cement och betong, kan tas upp av den expansionsvolym som finns tillgänglig /20-14/. Volymökning av avfallsmatriser och avfallskollin till följd av vattenupptag i jonbytmassor konditionerade i bitumen och bildning av volymexpanderande korrosionsprodukter, kan orsaka spänningar i omgivande betongbarriärer om inte tillräckligt med tomvolymer finns tillgängligt för att ta upp denna volymökning, se avsnitt 20.2.3.

20.2.7 Sprickbildning

Karbonatisering – på grund av reaktioner med koldioxid/karbonat som bildas vid nedbrytning av organiskt material i avfall – kan sätta igen porer i betongen, vilket kan leda till sprickbildning. Detta påverkar primärt cement och betong i avfallskollin i de fall avfallet är stabiliserat med cement och/eller packat i betongkokiller. Även mikrobiella processer kan leda till sprickbildning, se avsnitt 20.2.16. Mängden nedbrytbart organiskt material i siloförvaret är relativt liten och förhållandena i övrigt är inte särskilt gynnsamma för att upprätthålla mikrobiell aktivitet i vare sig siloförvaret eller de bergsalar som har betongbarriärer /20-11/.

Korrosionsprodukter, se avsnitt 20.2.12, har större volym än det ursprungliga järnet varav ett tryck från korrosionsprodukterna på omgivande betong uppstår, vilket kan ge upphov till sprickbildning /20-14/.

Även expansion och kontraktion av avfallet kan ge upphov till sprickbildning. Se även avsnitt 21.2.7.

Program

Studier pågår om inverkan av karbonat på betong i SFR. Programmet omfattar termodynamisk modellering av betongbarriärernas långsiktiga funktion vid förhöjda karbonatkoncentrationer och bedömning av konsekvenserna av medfällning för relevanta radionuklider.

Ett projekt med syfte att studera gaspermeabiliteten hos betong och cement, vilket relaterar till sprickbildning, beskrivs i avsnitt 6.3.4.

20.2.8 Bergutfall

För de försvarsdelar som saknar tekniska barriärer (BLA) kan bergutfall direkt påverka avfallet. I de försvarsdelar som omgärdas av tekniska barriärer finns ingen direkt påverkan på avfallet av bergutfall.

Program

För de forskningsinsatser SKB planerar kring bergutfall hänvisas till avsnitt 21.2.8.

20.2.9 Upplösning/utfällning

Upplösning av avfallet frigör joner från jonbytarmassor och mobiliserar ämnen som blir tillgängliga för transport. Processer som vattentransport kan ändra vattensammansättningen och specieringen kommer att ändras när kemiska jämvikter inställer sig. Detta kan leda till att ämnen lösta i vattnet faller ut och immobiliseras. Upplösning av salt från indunstarkoncentrat frigör klorider, karbonater och sulfater som i sin tur reagerar med omgivande betongbarriärer och jonbytarmassor. Hur snabbt upplösningen sker beror på hur avfallet är konditionerat och inneslutet, se även avsnitt 20.2.3. I säkerhetsanalysen SAR-08 antogs att alla radionuklider från cementingjutet avfall var tillgängliga för transport när förvaret vattenfylldes.

Vattenupptaget i bitumenmatrisen är långsamt, vilket innebär att upplösningen och frigörelsen av lösta salter sker under en relativt lång tidsperiod, se avsnitt 20.2.3. Detta talar för att påverkan på omgivande betong bör vara liten. Man kan dock inte helt utesluta att de lösta salterna med tiden (framför allt de första 1 000 åren) kan koncentreras i så hög grad, att närliggande betong kan påverkas med porositetsförändringar och eventuellt sprickbildning som följd. För att testa denna hypotes krävs en mer detaljerad analys.

Under driften av SFR bildas korrosionsprodukter som järnoxider och järnhydroxider, som kan sorbera och möjligen samfälla många element. Detta indikerar att utfällning av korrosionsprodukter är en process som kan påverka radionuklidtransporten i förvaret.

Program

Det program som initierats för att öka förståelsen kring denna process beskrivs i avsnitt 21.2.9 samt 21.2.10. Ytterligare studier för att kartlägga hur snabbt radionuklider frigörs från avfall konditionerat i olika matriser kan bli aktuella.

20.2.10 Degradering av organiska ämnen

Kemisk degradering av organiska ämnen och material i avfallet eller dess matris kan generera produkter som påverkar förvarets långsiktiga säkerhet. Bildandet av produkter som har en komplexbildande förmåga kan under vissa omständigheter påverka sorptionen och därmed radionuklidtransporten. Olika radionuklider kommer att påverkas i olika utsträckning. Vilka radionuklider som bildar lösliga komplex med organiska komplexbildare påverkas i stor grad av i vilket oxidationstal radionukliden befinner sig och om det bildade metall-organiska komplexet är starkare än det hydroxidkomplex som bildas när den organiska komplexbildaren är frånvarande.

En viktig mekanism för nedbrytandet av organiska ämnen och material i avfallet är hydrolys vid de höga pH:n som genereras i cementporvattnet.

Ett antal organiska avfallskomponenter har undersökts med avseende på alkalisk nedbrytning. Nedbrytningsprodukternas påverkan på sorptionen och lösligheten av ett antal radionuklider har undersökts /20-15/.

De flesta av dessa ämnen är inte relevanta för den långsiktiga säkerheten av SFR, medan andra kan ha betydelse /20-16, 20-17/. Störst inverkan har isosackarinat (ISA) som förekommer i två diastereomera former α respektive β /20-18/, se figur 20-2. ISA produceras genom basisk hydrolys av cellulosa och bildar polydentala komplex vid höga pH då hydroxylgruppen deprotoneras och binder till radionuklider. Starka komplex bildas med tri- respektive tetravalenta radionuklider /20-19/.

Nedbrytning av jonbytarmassor kan ge produkter med komplexbildande egenskaper. Alkalisk hydrolys av anjonbytarmassor kan ge upphov till aminer med komplexbildande egenskaper /20-16/. Degradering av katjonbytarmassor ger oxalat som den huvudsakliga nedbrytningsprodukten. Enligt ett flertal undersökningar har dessa nedbrytningsprodukter från jonbytarmassor ingen signifikant inverkan på sorptionen av radionuklider på betongmaterial /20-17, 20-16, 20-20/. Vid radiolytisk nedbrytning av jonbytarmassor kan sulfat och oxalat bildas /20-21/. Sulfat förväntas bilda ettringit (ett hydrerat Ca-Al-sulfat) vid reaktion med cement och betong /20-14/. Oxalat påverkar sorptionen av metaller vid neutrala till sura förhållanden. Vid de förhållanden som råder i betongmiljö är effekten begränsad dels på grund av att hydroxidjonerna tävlar med oxalat gällande komplexbindningen, dels på grund av utfällning av oxalat som kalciumoxalat.

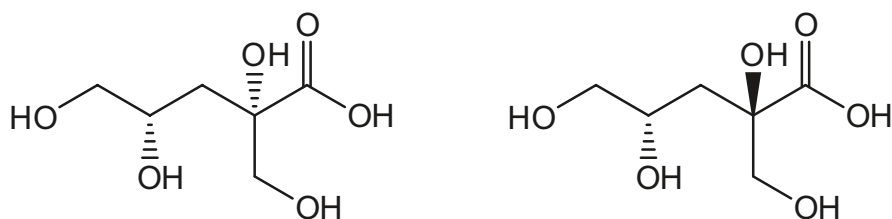
Det har visats att radiolytisk nedbrytning av bitumen vid höga pH huvudsakligen resulterar i mono- och dikarboxylater och karbonater /20-22/. Av dessa är det oxalat som skulle kunna vara en tänkbar komplexbildare, men den bedöms vara försumbar i betongmiljö eftersom dess kalciumsalt är olösligt och kommer att falla ut. Dessutom bedöms strålningen vara för låg, förutom i de mest aktiva kollina, för att över huvud taget ge radiolytisk nedbrytning av bitumen /20-12/.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

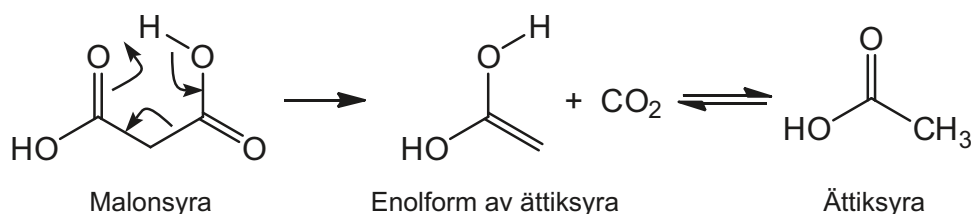
Sedan Fud-program 2007 har förfinade hastighetskonstanter för nedbrytningen av cellulosa publicerats /20-23/.

En studie angående oxalsyras degradering under slutförvarsbetingelser har visat att karboxylsyror med elektron dragande grupper på α -kolatomen undergår dekarboxylering under mycket milda betingelser. Malonsyra och acetoättiksyra är exempel på detta, se figur 20-3.

Det första steget i reaktionen innebär överföring av en proton och samtidig spjälkning av en kol-kolbindning. Den bildade enolen tautomeriserar därefter till den korresponderande keto-formen (ättiksyra), vilken i det här fallet är den mest stabila av de två tautomererna. Bildandet av enolformen är väsentligt för att reaktionen ska ske under milda betingelser. Vid dekarboxylering av oxalsyra kan en sådan tautomer inte bildas. Dekarboxylering av oxalsyra kräver därför mer forcerade betingelser /20-24/.



Figur 20-2. α -isosackarinsyra till vänster respektive β -isosackarinsyra till höger.



Figur 20-3. Dekarboxylering av malonsyra till ättiksyra och CO_2 .

Karboxylsyror, till exempel malonsyra, dekarboxyleras cirka 50 gånger snabbare under sura betingelser än under de basiska som kommer att råda i förvaret /20-24/. Båda karboxylgrupperna kommer således att vara deprotonerade under förväntade framtida betingelser i SFR.

Löslighetsprodukten för kalciumoxalat är cirka 2×10^{-9} /20-25/. Det innebär, att vid en koncentration av 0,04 molar (M) oxalsyra, så kommer mindre än 0,1 procent att föreligga i lösning och resten som utfällt kalciumoxalat, förutsatt att Ca(II) -koncentrationen är av samma storleksordning som halten oxalsyra. Oxalsyra och i högre grad oxalater är mycket stabila föreningar. SKB:s bedömning är, att de kommer att brytas ned i en mycket långsam takt. Den nedbrytning som ändå sker, bör ge upphov till myrsyra samt koldioxid. Detta innebär att den ena karboxylgruppen i oxalsyra oxideras från +III till +IV i koldioxid, och den andra karboxylgruppen reducerad från +III till +II i myrsyra. Reaktionshastigheten är dock svårbedömd under givna betingelser.

Program

SKB har initierat ett program vid Chalmers för att studera nedbrytningen av cellulosa till de två diastereomera formerna α - och β -isosackarinsyra och dess potentiella skillnader i komplexbildande förmåga samt löslighet under de förhållanden som väntas råda i SFR. Vidare kan det tänkas behövas ytterligare studier kring filterhjälpmedlet UP2:s (polyakrylnitril-baserad polymer) nedbrytning och dess nedbrytningsprodukters potentiella komplexbildande förmåga, se avsnitt 21.2.12.

20.2.11 Speciering

Specieringen av de radionuklider som finns i SFR beror på pH samt oxidationstalet på varje radionuklid. pH i förvaret förändras över tiden varvid specieringen av vissa pH-känsliga radionuklider kommer att ändras och deras sorptionsförmåga kommer att påverkas.

Syret som finns i förvaret vid förslutning kommer snabbt att förbrukas genom korrosion av stål i behållare och armeringsjärn, oxidation av löst järn(II) och sulfid i vattnet samt genom mikrobiella processer. En låg redoxpotential kommer att bibehållas i de olika förvarsdelarna genom att Fe(II) -joner frigörs vid anaerob stålkorrosion och från korrosionsprodukter. När allt järn är korroderat kommer redoxpotentialen att domineras av grundvattnets sammansättning och reducerande förhållanden kommer att bibehållas.

Organiska komplexbildare kan komma att påverka specieringen och sorptionen för vissa radionuklider och därmed påverkas radionuklidtransporten ut ur förvaret. Eftersom SFR ligger i ett förhållandevis ytnära läge kan det inte uteslutas att oxiderande förhållanden uppstår i samband med ett kallare framtida klimat, till exempel genom inträngning av smältvatten från permafrost

eller inlandsis in i förvaret. Om oxiderande förhållanden råder kommer redoxkänsliga ämnen att oxidera. Ett ändrat oxidationstal på vissa radionuklider kan medföra att dess speciering, komplex med organiska komplexbildande ämnen samt sorberande förmåga förändras, vilket i sin tur påverkar radionuklidtransporten och vattensammansättningen.

Program

Om modelleringar visar på att osäkerheter i ingående data får ett stort genomslag på resultaten av modelleringarna av systemet, kan det bli aktuellt med experimentella studier för att minska osäkerheterna.

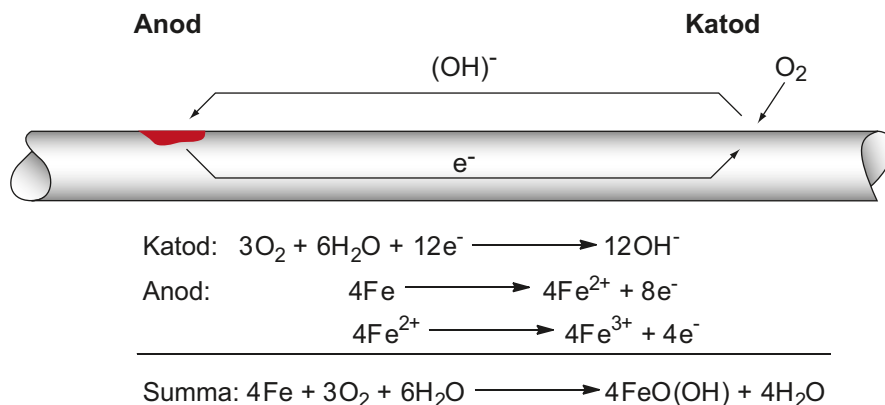
Som ett led i att ständigt förbättra och öka förståelsen kring konsekvenserna av utsläppta radionuklider från SFR planeras modellering av den specifika aktiviteten av det organiska C-14 som migrerar ut ur förvaret. Inledningsvis kommer en modell att tas fram där nedbrytningen av cellulosa till isosaccarinsyra (ISA) påverkar den specifika aktiviteten av organiskt C-14. Detta kan i förlängningen leda till att en förfinad biosfärmodell för C-14 kan tas fram. Potentiellt kan detta leda till mindre konservativa antaganden av det framtida dosbidraget från organiskt C-14.

20.2.12 Korrosion

Så länge som syre finns närvarande, det vill säga under driftskedet och en kort tid efter förslutning, kommer korrosionen av metaller att domineras av aeroba korrosionsförlopp.

Ett väl ingjutet armeringsjärn i betong befinner sig i en miljö med ett pH-värde > 12,5 till följd av den höga alkalinitet som råder i betongen. I denna miljö försätts armeringen i ett så kallat passivt tillstånd och någon korrosion sker normalt inte. Det passiva tillståndet kan dock brytas, dels genom karbonatisering av täcksiktet till följd av koldioxidinträngning, dels genom inträngning av kloridjoner till armeringens nivå. När det passiva tillståndet bryts är det stor sannolikhet för korrosion i konstruktionen. Denna korrosion av armeringen begränsar livslängden hos konstruktionen. Armeringskorrosion kan liknas vid en galvanisk cell med en anod och en katod, där anoden är minuspolen varifrån det vandrar elektroner mot pluspolen, det vill säga katoden. För att den elektriska kretsen ska vara sluten fungerar porvattenlösningen, innehållande joner som den galvaniska cellens elektrolyt. Vid anoden uppstår korrosion i form av en lokal gropfrätning på armeringsjärnet när järnet oxiderar och bildar järnoxid. För en enkel principskiss över korrosionsförloppet, se figur 20-4.

När syret i förvaret förbrukats kommer reducerande förhållanden i förvaret att råda och korrosionen kommer att domineras av anaeroba korrosionsförlopp. Vid anaerob korrosion av metaller i avfallet, i avfallsbehållare samt i armeringen i kokiller och betongkonstruktioner bildas bland annat vätgas. Anaerob metallkorrosion är därmed den process som förväntas bidra med de största mängderna gas. Faktorer som påverkar korrosionen är tillgång till vatten och vattenkemin, främst pH, Eh och koncentrationen av lösta salter.



Figur 20-4. Principskiss aerob armeringskorrosion.

En sammanställning som gjorts av korrosionshastigheter för anaeroba förhållanden, som liknar de i SFR, visar på korrosionshastigheter för järn och stål i intervallet 0,1–10 mikrometer per år ($\mu\text{m}/\text{år}$) /20-1/. I gasbildningsberäkningarna har en korrosionshastighet för järn och stål på en $\mu\text{m}/\text{år}$ antagits vilket motsvarar en vätgasproduktion på cirka tre liter per kvadratmeter och år ($\text{liter}/\text{m}^2, \text{år}$) och fullständig korrosion av en fem millimeter plåt på 2 500 år. För aluminium och zink har en korrosionshastighet på en millimeter per år antagits, vilket motsvarar fullständig korrosion av allt material inom några år. I en av EU utgiven statusrapport om gasmigration och tvåfasflöde i underjordsförvar ges en översikt av experiment och arbeten som publicerats inom området gasgenerering före januari 1999 /20-26/. Sammanställda gasbildningshastigheter för olika material och miljöer stöder de antagna korrosionshastigheterna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

I säkerhetsanalysen för SFR används en korrosionshastighet av en $\mu\text{m}/\text{år}$ för järn och stål. Denna hastighet baserar sig på data som presenteras i /20-1, 20-27/.

Inducerad aktivitet som sitter bunden till korroderande material frigörs, och blir tillgängliga för transport, i takt med att materialet korroderar. Tidigare har SKB konservativt antagit att all radioaktivitet är tillgänglig för uttransport ur förvaret när detta är vattenfyllt. Det antagandet kan anses vara realistiskt för radioaktivitet bunden till jonbytmassor, eller i oxidskikt på metalliskt avfall, men inte för inducerad aktivitet i olika metalliska konstruktioner, till exempel reaktortankar, vilka kan tänkas deponeras i framtida SFR.

Reaktortankar innehåller två långlivade nuklider, C-14 och Mo-93, vilka på sikt kan utgöra en signifikant andel av dosbidraget från SFR. Dessa nuklider tillgängliggörs genom korrosion. Det medför att C-14 och Mo-93 successivt kommer att frigöras under uppskattningsvis 70 000 år (den tid det uppskattningsvis tar för reaktortankarna att korrodera om en korrosionshastighet på $1\mu\text{m}/\text{år}$ appliceras /20-1/). Mo-93 kommer därför till stor del att ha sönderfallit innan det tillgängliggörs, eftersom dess halveringstid är kort jämfört med tiden det tar för Mo-93 att frigöras. Från säkerhetsanalysen SAR-08 framgår det även att C-14 kommer att bidra med en maximal dos under tidsperioden 3 000–5 000 år fram i tiden, vilket är den tidsperiod då utströmningsområdet utgörs av en sjö. Vid slutet av denna tidsperiod kommer endast 5/70 av reaktortanken ha rostet sönder. Således finns uppskattningsvis endast 5/70 av den inducerade aktiviteten tillgänglig vid denna tid.

Program

Eftersom SFR innehåller större mängder järn i avfallsbehållare och armeringsjärn samt att större metallkomponenter kan komma att förvaras i SFR är det av vikt att bättre uppskatta den aeroba och anaeroba korrosionshastigheten i SFR-liknade miljö. Det kan göras genom förnyade litteraturstudier. Om inte tillräckligt med underlag återfinns i den vetenskapliga litteraturen kan det bli aktuellt med experimentella försök. En studie kring detta har initierats, se avsnitt 6.3.4 i del II.

20.2.13 Diffusion

I stillastående porvatten sker diffusion av lösta ämnen. Processen påverkar porvattnets sammansättning. Diffusionen är starkt sammankopplad med nästan alla kemiska processer i avfallet genom att den svarar för fram- och borttransport av reaktanter och reaktionsprodukter. Därmed är diffusion en central process för hela den kemiska utvecklingen och radionuklidtransporten i avfallet. I porösa medier påverkas diffusionshastigheten av sorptionen, se avsnitt 21.2.12.

Program

SKB följer utvecklingen inom ämnesområdet.

20.2.14 Advektion och blandning

Transporten av lösta ämnen antas kunna ske både advektivt och diffusivt genom avfallet. Initialt antas den diffusiva transporten vara dominerande i det betongsolidifierade avfallet och den advektiva transporten försumbar. När betongen degraderas kommer sprickor att uppstå och advektionen öka.

På mikroskopisk skala sker blandning genom dispersion. Dispersjonen har en inverkan på transporten av radionuklider och andra lösta ämnen, se avsnitt 21.3.

Adektion sker även i voidvolymen och i mellanrum mellan avfallskollin som inte återfyllts. Processen hanteras inom modellering av radionuklidtransport, se avsnitt 21.3.

Frånvaron av flödesvägar från BLA till de övriga bergsalarna gör att eventuell transport av ISA eller annat löst organiskt material från BLA till de övriga förvarsdelarna måste ske via diffusion genom mellanliggande berg.

Program

SKB följer utvecklingen inom ämnesområdet.

20.2.15 Kolloidbildning/kolloidtransport

Mängden och typen av kolloider och partiklar i vattnet kan påverka radionuklidernas rörlighet genom att fungera som bärare av dem. Förekomsten av kolloider i vattnet beror på vattnets innehåll av lösta salter och framför allt koncentrationen av positiva joner som destabiliserar kolloiderna. Kolloidhalten är försumbart liten i grundvatten där koncentrationen av kalciumjoner är större än 10^{-3} M (40 mg/l) /20-28/. Lakningen av betong bidrar också med lösta salter, vilket ytterligare försvårar bildningen av kolloider i de förvarsdelar som har betongbarriärer /20-29/. Detta antagande stöds av de analyser som utförts av grundvattnet i Maqarin i Jordanien /20-30/. Grundvattnet i Maqarin har ett pH på cirka 12,5 och en sammansättning som i övrigt liknar lakvatten från betong. Kolloidhalterna i detta vatten är mycket låga. Experimentella resultat stödjer slutsatsen att vid de låga kolloidhalter som erhålls i alkaliskt cementporvatten, är påverkan på sorptionen försumbar och att det gäller även för starkt sorberande nuklider /20-31/.

Program

SKB följer utvecklingen inom ämnesområdet. Se även 24.2.20, 24.2.28, 25.2.18, 25.2.19.

20.2.16 Mikrobiell aktivitet

Det organiska materialet i avfallet i SFR, framför allt cellulosa, utgör en möjlig energi- och näringskälla för mikroorganismer. Mikroorganismer kan bryta ned det organiska materialet till olika komponenter som i varierande omfattning kan skapa problem. Den mikrobiella aktiviteten är beroende av att ett vattenflöde passerar förvaret, bland annat för transporten av näringsämnen till mikroorganismer men också för borttransporten av metaboliter som annars kan förgifta mikroorganismerna. I och med att vattenflödet genom förvaret är lågt minskar den mikrobiella aktiviteten, och mikrobiell inverkan på SFR bedöms vara liten /20-11/. Vidare är miljön i SFR speciell (till exempel högt pH) och på intet sätt optimal för mikrobiellt liv.

Vissa mikroorganismer kan, främst i närvaro av syre, bilda syror som skulle kunna påverka cement- och betongkonstruktionerna i SFR. Förhållandena i SFR kommer emellertid att vara syrefria, förutom under en kort initial period efter förslutningen (och eventuellt i samband med en framtida istid), och syrabildning anses därför försumbar.

Sulfatreducerande bakterier bildar sulfid, som verkar korrosivt på metaller. Under speciella förhållanden, med lokala vattenflöden nära metalltytor och med tillskott av organiska ämnen från förvaret, kan gropfrätning ske.

Biologisk nedbrytning av bitumen i SFR förväntas inte ha signifikant effekt på bitumenmatrisen. Orsaken till detta är att denna typ av nedbrytning generellt sett är väldigt långsam /20-12/ och att miljön i SFR är ogynnsam för mikrobiell aktivitet /20-11/.

Vid mikrobiell nedbrytning av organiska material bildas oftast enkla organiska föreningar (till exempel acetat, enkla alkoholer) eller oorganiska föreningar (till exempel koldioxid/bikarbonat/karbonat) som slutprodukter. Vissa av dessa ämnen kan ha komplexbildande egenskaper. Mikroorganismer kan även använda organiska ämnen som energikälla och reducera mängden organiska komplexbildare. Vid anaerob nedbrytning används olika oorganiska källor såsom nitrat och sulfat som oxidanter. För att nedbrytning ska ske krävs även tillgång till vatten, näringsämnen och vissa spårämnen. Slutprodukterna vid anaerob nedbrytning är vätgas, metan och koldioxid. Den kemiska miljön (pH och jonstyrka), men även andra faktorer såsom temperatur, tryck och strålningsnivå, är av betydelse för den mikrobiella nedbrytningshastigheten. Av de organiska material som återfinns i förvaret såsom jonbyttarmassor, bitumen och cellulosa, är cellulosa det material som förväntas ha den högsta nedbrytningshastigheten.

Förutsättningarna för mikrobiell nedbrytning av organiska material under förhållanden som kan tänkas råda i SFR efter förslutning har utretts /20-11/. Där refereras till experiment som tyder på att gasbildningen avtar efter ett initialt bildningsskede. Enligt utredningen är miljön i SFR inte optimal för mikrobiell nedbrytning, men även ett så högt pH som 12 är inte något hinder för mikrobiell aktivitet. Gasbildningen i SFR från mikrobiell aktivitet begränsas av tillförseln av oxidanter och näringsämnen samt bortförseln av reaktionsprodukter. I beräkningarna av gasbildning från mikrobiell nedbrytning har nedbrytningshastigheter för cellulosa motsvarande fullständig förbrukning inom knappt 200 år antagits. Detta motsvarar en nedbrytningshastighet om 0,2 mol per kilo och år (mol/kg·år) och en gasbildningshastighet på cirka två liter per kilo och år (l/kg·år) med antagandet att 50 procent av gaserna är inerta /20-1/.

De fåtal experiment som finns gällande mikrobiell nedbrytning av bitumen, jonbyttarmassor och plaster indikerar att processerna är mycket långsamma. För säkerhetsanalysberäkningarna har det antagits att 0,002 mol/kg·år bryts ner, vilket motsvarar total degradering på 15 000 år och en gasbildningshastighet om 0,02 l/kg·år, vid antagandet att 50 procent inerta gaser bildas vid nedbrytningen /20-1/.

Vilka mikroorganismer som finns i grundvattnet, och vilka förutsättningar dessa har att vara aktiva i den miljö som råder i SFR efter förslutning, är inte fullständigt kartlagt men bedöms i nuläget inte kräva några insatser.

Program

SKB följer utvecklingen inom ämnesområdet. Se även avsnitt 25.2.16.

20.2.17 Radiolytisk degradering

När kemiska substanser utsätts för radioaktiv bestrålning kan kemiska bindningar brytas och nya ämnen uppstå. Viss produktion av vätgas på grund av vattenradiolys kring avfallsdelar med hög aktivitet kan inte uteslutas. Denna process har bedömts ha liten betydelse för avfallets utveckling.

20.3 Modellering – radionuklidtransport

Modellering av radionuklidtransport diskuteras gemensamt för låg- och medelaktivt avfall och de tekniska barriärerna i SFR i avsnitt 21.3.

21 Tekniska barriärer i SFR

I detta kapitel beskrivs den naturvetenskapliga forskning som SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen kring hur funktionen hos de tekniska barriärerna i SFR ändras under tidsperioden 100 000 år. För den forskning som SKB bedriver för att öka förståelsen av geosfär och biosfär hänvisas till kapitel 25 och 26.

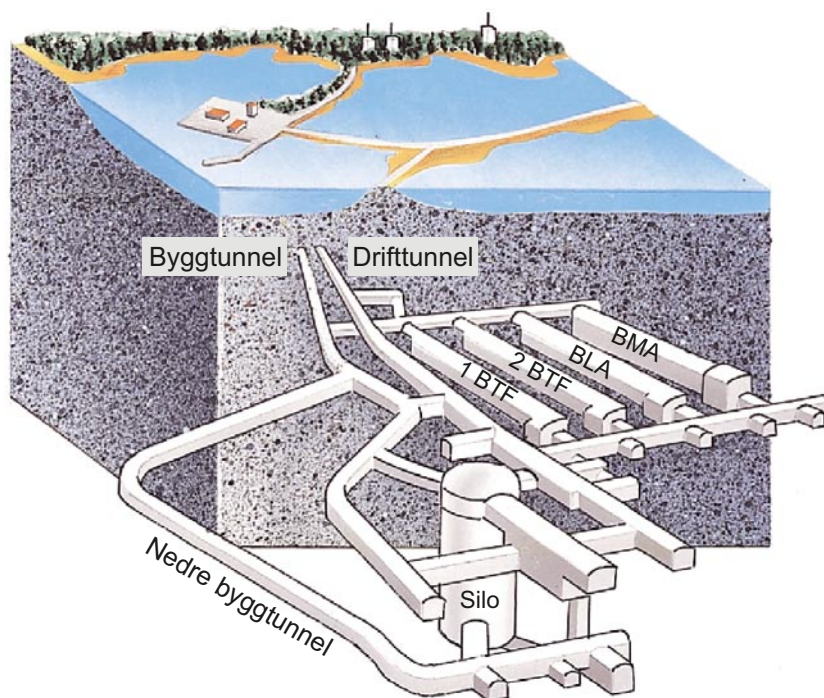
Säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet

Sedan Fud-program 2007 har arbetet med säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet strukturerats och därmed kan forskningen som beskrivs i detta Fud-program presenteras på liknande sätt som forskningen som rör säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret, SR-Site. I detta kapitel beskrivs forskningen kring initialtillståndet hos de tekniska barriärerna i SFR, och de processer som förväntas påverka förvaret efter förslutning. Eftersom detta är det första Fud-program där forskningen kring de tekniska barriärerna för kortlivat låg- och medelaktivt avfall beskrivs på detta sätt ligger fokus på beskrivning av variabler och processer samt program, snarare än slutsatser och nyvunnen kunskap sedan Fud-program 2007.

21.1 Initialtillståndet hos tekniska barriärer

De tekniska barriärerna som finns i vissa förvarsdelar i SFR har till uppgift att fördröja uttransporten av radionuklider från förvaret, se figur 21-1. Tekniska barriärer finns i BTF-, BMA- och siloförvaren. Siloförvaret är omslutet av två olika tekniska barriärer, betong och bentonit. Bottenbädden vid silon består av en blandning bestående av 90 procent sand och 10 procent bentonit.

Sprutbetongen som klär berget runt berggrummen samt golvplattorna av betong tillgodoräknas (i SAR-08) som tekniska barriärer i samtliga förvarsutrymmen förutom BLA.



Figur 21-1. De olika förvarsdelarnas placering i SFR.

De tekniska barriärerna i 1- och 2-BTF består av betongen i betongtankarna, betonggolvlattan samt övergjutningen av de avfallskollin som finns deponerade i 1-BTF.

I det följande avsnittet beskrivs forskningsprogrammet för initialtillståndet i de tekniska betongbarriärerna samt hålrummet som kan uppstå mellan avfallet och betongbarriärerna. Den forskning och utveckling som rör betongbarriären i Silo beskrivs i kapitel 24. Tidpunkten för det initiala tillståndet hos de tekniska barriärerna definieras på samma sätt som för det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet, se kapitel 20.

I programmet ingår även en kontinuerlig bevakning av om, och i så fall hur, initialtillståndet påverkas av det underhåll av SFR som ingår i SKB:s program, se avsnitt 5.2.2.

21.1.1 Variabler

Initialtillståndet är startpunkten för en säkerhetsanalys och beskrivs av de initiala värdena hos ett antal variabler, se tabell 21-1. Variablerna karaktäriserar barriärerna på ett lämpligt sätt för säkerhetsanalysen.

21.1.2 Geometri

De tekniska barriärernas geometri bestäms utifrån förvarets utformning samt av de yttermått som finns specificerade i respektive typbeskrivning av de betongtankar som tillgodoräknas som tekniska barriärer.

Utformningen beror på hur förvaret konstruerades vid uppförandet, eventuella åtgärder för underhåll under driften, och vilka åtgärder som vidtas vid förslutningen.

Stabiliteten hos berget närmast bergsalarna, när förstärkningselement såsom bergbultar och sprutbetong inte längre har kvar sin bärighet, är beroende av om och i så fall hur tomrum i bergsalarna återfylls.

Hur stabiliteten hos avfall, avfallskollin, betong- och bentonitbarriärer utvecklas beror på en kombination av mekaniska och kemiska processer.

Avgörande för långtidsstabilitet för bergsalarna i SFR är livslängden hos förstärkningselementen såsom bergbultar och sprutbetong. Så länge dessa har kvar sin bärighet bedöms förändringen i spänning och deformationer i bergmassan runt bergsalarna vara små. Normalt räknar man med en livslängd av 100–120 år hos den typ av förstärkningselement som använts vid byggandet av SFR, men de förlorar troligen inte hela sin bärförmåga förrän efter 200–250 år.

När bärförmågan hos framför allt bergbultarna har avtagit, kan man förvänta sig att bergblock lossnar och faller in i bergsalarna. Denna process beskrivs i avsnitt 21.2.8.

Tabell 21-1. Variabler för betong- och cementbarriärerna.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Geometriska mått för de tekniska barriärerna. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot avfallet/barriär och utåt mot geosfären.	21.1.2
Porgeometri	Porgeometri som funktion av tid och rum i barriärer. Ofta anges porositet, det vill säga den andel av volymen som inte upptas av fast material.	21.1.3
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i barriärer.	21.1.4
Vattenmättnad	Vattenhalt som funktion av tid och rum i barriärer.	21.1.5
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i barriärerna.	21.1.6
Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor	Vatten- och gastryck samt vattenflöden från omgivningen som funktion av tid och rum i barriärer.	21.1.7
Porvattensammansättning	Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) som funktion av tid och rum i barriärer.	21.1.8
Betongsammansättning	Den kemiska sammansättningen av betongen (plus eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i betongen. Detta inkluderar också föroreningar och andra mineral än portlandit.	21.1.9

Program

Området bedöms kräva mer forskning gällande tomrummets och återfyllnadens inverkan på hydrovariabler, se även avsnitt 20.1.2. Effekten av återfyllnad av olika material kommer att studeras.

21.1.3 Porgeometri

Porositeten i konstruktionsbetongen som utgör de tekniska barriärerna runt de olika förvarsdelarna, har beräknats till cirka 10 procent /21-1/. Däremot finns ingen information kring porernas storlek, vilket kan spela en viktig roll för vid vilken temperatur porvattnet i betongbarriärerna förväntas frysa till is. Porgeometrin påverkas av betongdegradering, se avsnitt 21.2.10.

Program

Borrkärnor har tagits från olika delar av barriärerna i BMA. Dessa ska undersökas bland annat med avseende på porstorlek. Detta kan leda till en ökad förståelse kring vid vilken temperatur porvattnet i betongbarriärerna förväntas frysa till is.

21.1.4 Temperatur

Den initiala temperaturen i förvaret sätts av det omgivande bergets temperatur. Eftersom avfallet inte alstrar någon signifikant värmeenergi till följd av stråldämpning, är avfallets bidrag till temperaturförändringar i de tekniska barriärerna försumbart.

21.1.5 Vattenmättnad

Initialt är vattenmättnaden i barriärerna låg vid förslutning på grund av att förvaret dränagepumpats. Visst vatten kan förekomma initialt via inträngning från vattenförande sprickor i berget och vattenhalten i de olika delarna är beroende av kontakten med det omgivande berget. Vattenhalten har en inverkan på de kemiska processerna i förvaret som till exempel armeringsjärnens korrosionsbenägenhet.

Betongen i barriärerna kommer att bli vattenmättad efter förslutningen, då dränagepumpningen upphör. En hydrogeologisk modell har använts för att beräkna hur lång tid det tar att fylla och mäta förvaret med grundvatten /21-2/. Beräkningarna visar att tomrummet (porositeten) som finns inuti siloförvaret mäts sist och att detta kan ta 25 år. Tiden det tar att fullständigt mäta BMA, BLA och BTF är endast några få år.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

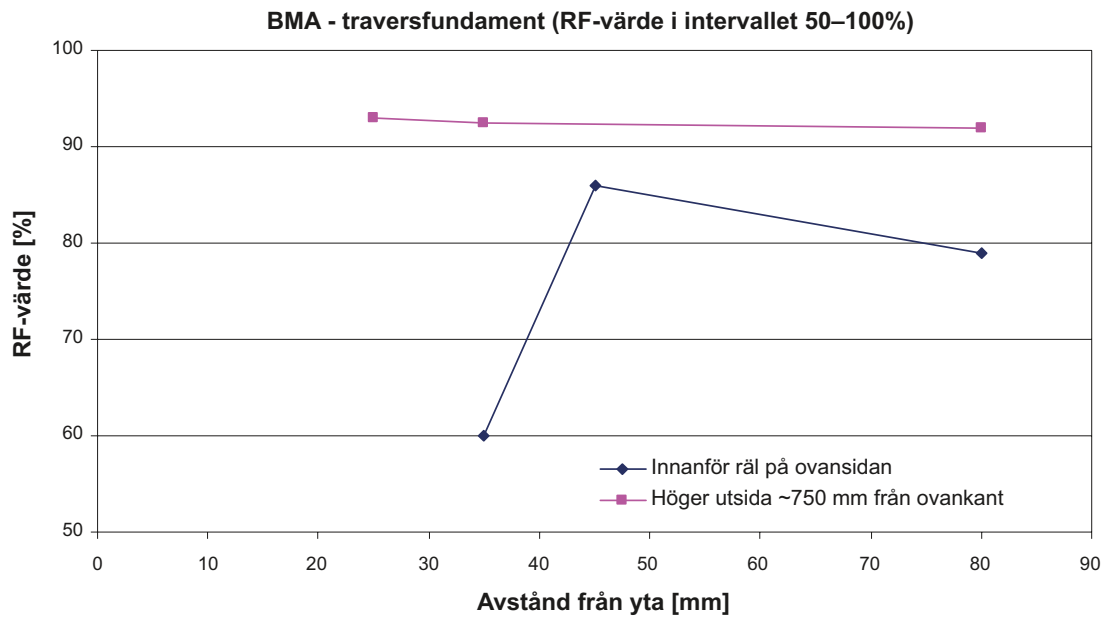
SKB har nyligen startat ett undersökningsprogram för konstruktionsbetongen i BMA. I detta program ingår bland annat att mäta den relativa fuktigheten i betongen (RF-värdet) på vissa utvalda platser i konstruktionen.

Under större delen av året leds det ner stora mängder luft för att ventilera bort radon och avgaser från fordonsdrift. Eftersom den tillförda luften under större delen av året håller en högre temperatur än vad som råder i SFR, uppnår luften en hög relativ fuktighet till följd av att mätnadsånghalten blir lägre med en låg temperatur.

Efter en långtidsexponering av betong i en miljö med hög luftfuktighet, kommer betongen att ställa sig i jämvikt med omgivningen med avseende på den relativa fuktigheten. De uppmätta värdena på den relativa fuktigheten i provkroppar från BMA visar att det råder en hög relativ fuktighet i vissa delar av betongen i BMA, se figur 21-2.

Program

Det pågående programmet har ännu inte avslutats och ytterligare undersökningar är planerade för BMA- och BTF-förvaren. Programmet syftar till att få en helhetsuppfattning om tillståndet i betongkonstruktionerna främst i BMA-förvaret.



Figur 21-2. Uppmätta värden på relativa fuktigheten (RF-värden) i borrhärnor i traversfundamentet i BMA.

Vattenmättnadsgraden hos betongen kan påverka korrosionshastigheten och därmed barriärernas funktion. Det är därför av intresse att ta reda på hur vattenmättnadsgraden förändras under drifttiden och tiden efter förslutning, innan förvaret har blivit fullt vattenmättat.

21.1.6 Mekaniska spänningar

Expansion/kontraktion av avfallet och bergutfall har inverkan på mekaniska spänningar, se avsnitt 20.2.6 och avsnitt 21.2.8.

Korrosion av armeringsjärn i betongkonstruktionerna kan både initialt och på sikt ge upphov till mekaniska spänningar i barriärerna, se avsnitt 21.2.6, 21.2.7 och avsnitt 20.2.12. Detta kan leda till att betongens mekaniska egenskaper försämras.

Program

Undersökningar för att statusbedöma betongkonstruktionerna i BMA- och BTF-förvaren (betongtankar som har placerats in under ett tidigt driftskede) har påbörjats. Målet med undersökningarna är att få en bild över hur konstruktionerna har påverkats under de 22 år som SFR har varit i drift.

21.1.7 Hydrovariabler och hydrologiska randvillkor

Hydrovariablerna är vattentryck och gastryck och randvilkoren utgörs av vattenflödet från geosfären. Vattenflöden förekommer inte initialt i de tekniska barriärerna eftersom förvaret dränagepumpas under driftskedet.

Platsen för SFR valdes delvis för att den ligger i ett område med begränsad hydraulisk gradient och begränsad spricktransmissivitet. Placeringen av förvaret gjordes delvis med målsättningen att få låga vattenflöden genom de olika förvarsdelarna. De olika förvarsdelarna har konstruerats så att de har olika förmåga att begränsa vattenflödet.

Siloförvaret har den mest kvalificerade förvarskonstruktionen; allt avfall är konditionerat, alla avfallspaket är kringgjutna med porösbetong, det finns en inre fackverkskonstruktion av betong, ytterväggarna består av tjock betong och framför allt omges betongsilon av bentonit. I BMA är också allt avfall konditionerat. BMA har en enklare betongkonstruktion och kommer möjligen att återfyllas med material som har högre hydraulisk konduktivitet än betongen, vilket skulle medföra vattenströmning genom återfyllningen i stället för genom den tätare betongkonstruktionen som

innesluter avfallet. I 1BTF och 2BTF ställs betongtankarna upp så att de bildar en inre struktur, som är mindre genomsläpplig för vattenflöde än sido- och toppfyllningen av grus eller sand. BLA har ingen konstruktion som begränsar vattenflödet genom avfallet.

Under driftskedet av SFR kommer förvaret att hållas dränerat och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av en atm (cirka 0,1 megapascal (MPa)) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa i omgivningen beroende på luftfuktigheten. Däremot kommer det att finnas ett initialt porvattenundertryck i den omättade betongen som driver in transporten av vatten, så att betongens vattenhalt är i jämvikt med luftens.

När dränagepumpningen av förvaret upphör, kommer tunnarna att vattenfyllas och vattentrycket i det omgivande berget att öka. Vattnet kommer att flöda in i förvaret via vattenförande sprickor. I allmänhet kan inte barriärerna absorbera allt vatten som rinner genom en spricka, varför ett vattenövertryck bildas. Vattentrycket driver flödet genom förvarsdelarna och dess omgivning. Denna process beskrivs i avsnitt 21.2.4.

21.1.8 Porvattensammansättning

Initialt kommer porvattnet i betongen att hålla ett pH på 13,1 och den kemiska sammansättningen beror på mineralsammansättningen hos betongen och på hur betongen varit exponerad för grundvatten. Porvattensammansättningen har en inverkan på de kemiska processerna i förvaret, som till exempel armeringsjärnets korrosionsbenägenhet.

Betongkonstruktionerna i SFR består huvudsakligen av Degerhamn anläggningscement. Analys av cementporvatten från färsk och lakad cement redovisas i tabell 21-2. Det framgår av analyserna att de lösliga alkalihydroxiderna orsakar ett högt pH som sjunker när dessa lakas ut.

Porositeten i fullständigt hydratiserad konstruktionsbetong av den typ som används i SFR är cirka 10 procent /21-1/.

Porvattensammansättningen påverkas av alla kemiska processer både i avfallet och barriärerna samt sammansättningen hos det inträngande grundvattnet.

Program

SKB har nyligen påbörjat ett provtagningsprogram för konstruktionsbetongen i BMA. I detta program ingår bland annat att mäta kloridhalten i betongen på vissa utvalda platser i konstruktionen.

21.1.9 Betongsammansättning

Betongväggarna i förvaret har ett w/c (water/cement) tal på cirka 0,47. Cement består huvudsakligen av kristallin portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) och amorf till krypto-kristallin kalciumsilikathydrat (CSH-gel).

Tabell 21-2. Analys av cementporvatten från färsk respektive urlakad cement (jonkoncentrationer i millimol per liter [mmol/l]).

Parameter	Färsk cement ^{a)}	Lakad cement ^{b)}
pH	13,1	12,6
SO_4^{2-}	0,04	0,02
Cl^-	<0,06	2 ^{c)}
Na^+	28	3 ^{c)}
K^+	83	0,1 ^{c)}
Ca^{2+}	0,9	20
Si_{tot}	0,8	0,003
Al_{tot}	0,04	0,002
OH^-	114	36

^{a)} utpressat porvatten /21-3/,

^{b)} krossad cement, analys av lakvatten /21-4/,

^{c)} samma som halten i lakvattnet före lakningsexperimentet.

Betong innehåller förutom cement stora mängder ballast, så som sand, grus och krossat berg. Alla cementmaterial innehåller till viss del överskottsmaterial så som ettringite (hydrerat Ca-Al-sulfat), hydrotalcite (hydrerat Mg-Al-karbonat) och Friedels salt (Ca-Al-Cl-hydrat) /21-3, 21-5, 21-6, 21-7, 21-8, 21-9/.

Förutom rena oorganiska mineral innehåller också betongen i de tekniska barriärerna mindre mängder organiska tillsatsmedel. Dessa används vid gjutningen av betongen för att kunna ge betongen gynnsamma gjutegenskaper, till exempel flytmedel. När avfallet i silon kringgjuts tillsätts cellulosa till cementen, detta kommer att bidra med cirka 9 000 kilo cellulosa i silon när den fyllts. Betongsammansättningen påverkas av den kemiska cement- och betongdegraderingen, se avsnitt 21.2.10.

21.2 Processer

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet hos de tekniska barriärerna och deras hålrum. Vissa processer sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga när barriärerna är vattenmättade eller när anaeroba förhållanden råder.

21.2.1 Översikt av processer

De processer som påverkar förhållandena i barriärerna kan, liksom processerna som påverkar avfallet, delas in i fyra olika huvudklasser: termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska. Under varje huvudklass kan ett antal olika processer förekomma vilka kan växelverka med varandra.

Termiska processer

Temperaturens inverkan på de tekniska barriärerna är inte försumbar och frysning förändrar drastiskt betongens integritet /21-10/. Detta leder till att de kemiska och mekaniska retardations-egenskaperna hos betongen förändras och att radionuklidtransporten ut ur förvaret påverkas. I allt väsentligt kommer förvarets och därmed barriärernas temperatur att bestämmas av värmeutbytet med omgivande berg och grundvatten. Avfallets inverkan på temperaturen är försumbar, eftersom de värmealstrande processerna i avfallet bedöms vara försumbara. Följande termiska processer behandlas:

- Värmetransport, se avsnitt 21.2.2.
- Frysning, se avsnitt 21.2.3.

Hydrauliska processer

Vattenflödet genom förvaret bestäms av vattengenomsläppligheten i de olika komponenterna i förvaret och av den hydrauliska gradienten. Om det samtidigt förekommer gas uppstår ett tvåfasflöde där både vattenflödet och gasflödet påverkas av den relativa mättnadsgraden av respektive fas. Storleken av vattenflödet i förvaret bestäms i hög grad av det omgivande grundvattenflödet. Följande hydrauliska processer behandlas:

- Vattentransport, se avsnitt 21.2.4.
- Tvåfasflöde/gastransport, se avsnitt 21.2.5.

Mekaniska processer

Barriärerna i de olika förvarsdelarna kommer att utsättas för extern mekanisk påverkan och interna volymsförändringar på samma sätt som avfallet, se avsnitt 20.2.1. Följande mekaniska processer behandlas:

- Expansion/kontraktion, se avsnitt 21.2.6.
- Sprickbildning, se avsnitt 21.2.7.
- Bergutfall, se avsnitt 21.2.8.

Kemiska processer

De fysiska egenskaperna hos olika betongkonstruktioner påverkas av flera processer, som omkristallisation, vattenupptag, kemisk nedbrytning, korrosion av metaller, lösning/fällning och bildande av olika korrosionsprodukter med gasutveckling som följd. Av dessa är det främst upptag av vatten med påföljande omvandling av betong, eventuellt med volymexpansion och korrosion av metaller, som har någon större inverkan på barriärernas utveckling med avseende på dess innehåll av lösta ämnen och kolloidhalt. Vattnets sammansättning förändras på grund av advektion och blandning. Koncentrationsskillnader utjämnas via diffusion. Sorptionen av radionuklider påverkas till största delen av vattensammansättningen i förvaret. Halten av ämnen som förekommer i små mängder, till exempel komplexbildare kan ha en stor inverkan på sorptionen av katjoner som finns lösta i vattnet. Följande kemiska processer behandlas:

- Upplösning/Utfällning, se avsnitt 21.2.9.
- Kemisk cement- och betongdegradering, se avsnitt 21.2.10.
- Korrosion, se avsnitt 21.2.11.
- Sorption, se avsnitt 21.2.12.
- Diffusion, se avsnitt 21.2.13.
- Advektion och blandning, se avsnitt 21.2.14.
- Kolloidbildning/kolloidtransport, se avsnitt 21.2.15.
- Mikrobiell aktivitet, se avsnitt 21.2.16.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i barriärerna. Processernas växelverkan med varandra diskuteras inte här utan kommer att beskrivas i den processrapport som ska författas som underlagsrapport till säkerhetsanalysen för utbyggnadsprojektet.

21.2.2 Värmetransport

När temperaturen på ytan av förvaret förändras kommer detta, med en viss fördröjning, att påverka barriärernas temperatur. När temperaturen förändras kan barriärernas egenskaper förändras, vilket kan medföra att deras mekaniska och hydrauliska egenskaper förändras.

Program

Den forskning SKB bedriver rörande klimatets inverkan på temperaturen i barriärerna beskrivs i kapitel 19.

21.2.3 Frysning

Betongs frostbeständighet eller motstånd mot frostsprängning är en egenskap som beror på porstrukturen i betongen. Gelporerna och kapillärporerna fylls mycket snabbt av vatten vid en normal utomhusanvändning av betongen. Vid vattenabsorption under lång tid fylls även de grövre porerna (luftinblandningsporerna med mera) med vatten. När betongen fryser övergår en viss del av porvattnet till is, och den uppkomna expansionen kan åstadkomma så stora spänningar inne i betongen att den skadas allvarligt /21-10/.

Vattnets fryspunkt sjunker med minskad porstorlek. Exempelvis fryser inte vatten i en por med diametern 150 ångström förrän vid -20 °C. Vid den normala frystemperaturen, strax under 0 °C, är därför vatten i gelporerna och i de finaste kapillärporerna fortfarande inte fruset. Förutom porstorleken, är den frysbara vattenmängden även beroende av om betongen först varit helt eller delvis uttorkad innan porerna återfylls med vatten.

Särskilt utsatt för frostsador är betong som saknar luftinblandning, betong som är ung och betong vars yta exponeras för svaga saltlösningar, till exempel från tölsalter eller från havsvatten. Skaderisken ökar med ökad fuktbelastning.

I ett slutförvar av typen SFR-silo eller BMA är fuktbelastningstiden så lång att inte ens det mest effektiva luftporsystem torde kunna skydda betongen i detta avseende, eftersom förvaret kommer att vara vattenfyllt när frysning sker.

Frostbelastad betong utsätts för två typer av frostangrepp:

- a) Saltfrostangrepp som är ett rent ytangrepp förorsakat av frysning och tösaltning, eller frysning och havsvatten. Skador uppträder i form av avflagnad betong.
- b) Inre frostangrepp och uppsprickning av gelen förorsakat av att det bildas för höga sprängande tryck i betongens inre delar orsakad av expansionen när det frysbara vattnet övergår till is. För att detta ska ske måste betongen vara vattenmättad över en kritisk nivå.

Under permafrostbelastning förväntas inre frostangrepp. Vattnet i anläggningen kommer inte att vara helt rent från salt, utan kommer att ha en viss salthalt beroende på den geokemiska miljön. Salt i vattnet sänker frystemperaturen och medför att expansionen av vattnet vid en viss frystemperatur blir lägre än om man räknar med helt rent vatten.

För inre frostangrepp observeras skador genom att betongen visar tecken på expansion och betongytorna får ett tätt mönster av grova och djupa sprickor vilka löper i alla riktningar. Ytorna kan däremot vara helt fria från avflagningar. Skador av inre frostsprängning kan även innebära en förlust i hållfasthet och elasticitetsmodul, vilket är en följd av att porositeten ökat.

Följande parametrar styr det inre frostangreppet:

- Porsystemet generellt; det vill säga porvolym, porernas diameter, porstorleksfördelning och poravstånd.
- Vattencementtal (w/c) hos betongen.
- Fuktmättnad i porerna.
- Mängd frysbart vatten.
- Tillgång till vatten.
- Tiden, det vill säga tillgänglig tid för att fylla porsystemet till den högsta (kritiska) fuktmättnadsgrad som kan accepteras om frostsador ska undvikas. Denna kan vara betydligt lägre än 100 procent.
- Om det finns mikrosprickor på grund av tidigare torkning eller tidigare frostskada.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och granskningen av dessa

Under framtagandet av Fud-program 2007 pågick fortfarande studier kring frysningens påverkan av de tekniska barriärerna. Dessa studerade enbart frysningens påverkan av de tekniska barriärerna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Från de överväganden och beräkningar som gjorts inom ramen för detta arbete kan en del slutsatser dras rörande barriärfunktionen hos betong efter frysning och tining. Arbetet med att ta fram denna kunskap har uteslutande baserats på litteraturstudier och teoretiska resonemang och inga laborativa försök har genomförts /21-10/. I rapporten drogs följande slutsatser:

- När inre frysning kan bli aktuellt kommer betongen i silon att ha ett vatteninnehåll som överskrider det kritiska värdet för att undvika inre frysning.
- Vid den första frysningen kommer betongen att få inre frostangrepp, som kommer att bryta upp materialet i sådan grad att dess barriärfunktion till stor del upphör. Det kvarvarande materialet har en barriärfunktion som liknar den hos naturliga sand/grus-strukturer.
- Efter frysning och upptining kan man inte påräkna någon funktion som diffusionsspärr utöver den som finns i sand/grus-strukturer hos den sönderfrysta betongen. Betongen har i detta läge en sand/grus-liknande struktur.
- Permafrostens längd i tiden kommer inte att ha betydelse för tjällyftningarna. Det som är avgörande för lyftningarnas storlek är tiden det tar för frysfronten att passera förvaret. Denna är tämligen lika mellan de studerade scenarierna.

Program

Studier över hur betongs frysegenskaper förändras med tiden i samband med den kemiska degraderingen pågår. Parallellt pågår också studier där porstorleken hos den konstruktionsbetong som utgör de tekniska barriärerna i SFR studeras närmare. Bättre kunskap om porstorleken leder till bättre noggrannhet i bestämning av fryspunkten hos de tekniska barriärerna, samt ökad förståelse för om temperaturens inverkan på förvaret när permafrost råder vid ytan.

21.2.4 Vattentransport

Vattenflödets storlek bestäms av geometri och konduktivitet hos de tekniska barriärerna och återfyllnadsmaterialet, se avsnitt 21.1.7 och avsnitt 21.2.14. Denna process beskrevs även i kapitel 20.

Program

Området behandlas främst via modelleringar av vattenflöden genom förvaret och de insatser SKB bedriver inom detta område beskrivs i avsnitt 21.3.

21.2.5 Tvåfasflöde/gastransport

För att den gas som bildas genom bland annat mikrobiell nedbrytning och metallkorrosion i avfallet och barriärerna ska kunna ta sig ut, krävs att gasförande passager bildas i barriärerna. Gastransporten och mängden förträngt vatten från siloförvaret och bergsalarna bestäms av de ingående barriärernas utformning och barriärmaterialens egenskaper.

För material med en fin porstruktur såsom betong är kapillärkrafterna av betydelse för det övertryck som behöver byggas upp för att transportera ut gasen. Vatten kommer att förträngas från betongen tills ett nätverk av tomma porer bildats för transport av gasen. När gasförande passager har bildats i barriären strömmar gasen ut, så länge som tryckskillnaden överstiger kapillärtrycket. Kapillärtrycket i en intakt konstruktionsbetong är av storleksordningen 1–2 MPa /21-11/. Om konstruktionsbetongen har små sprickor så krävs ett lägre övertryck för att transportera ut gasen. För en planparallell spricka med spricköppningen 0,1 millimeter krävs ett övertryck på 1–2 kilopascal (kPa) och för en spricka om 10 µm krävs cirka 15 kPa /21-12/. I betongkollin och betongkonstruktioner är det tillräckligt med ett antal småsprickor för att transportera bort den bildade gasen.

I siloförvaret omges avfallet av en porös betong med lågt motstånd mot gastransport. För att öppna upp gaspassager i denna krävs endast ett litet gasövertryck och mängden vatten som pressas ut har i experiment uppmätts till 0,1–2 procent av porvolymen /21-13/. I gastransportberäkningarna har antagits att två procent av porvolymen i betongen kan förträngas. För att gasen ska ta sig vidare ut genom gasavledningsrören och sand/bentonitbarriären i toppen krävs att ett gasövertryck byggs upp i betongsilon som motsvarar sand/bentonitbarriärens öppningstryck. Försök visar att det krävs ett övertryck på cirka 15 kPa för att åstadkomma gastransport genom sand/bentonitbarriären och att det vatten som förträngs endast motsvarar några promille av totala porvolymen /21-14/.

För en grusfyllning krävs endast små övertryck för att öppna upp transportvägar och för att driva gasen genom porositeten i fyllningen. Gas som har flödat genom eventuell grusfyllning och tagit sig till tomvolymen under taken i siloförvaret och bergsalarna kan sedan transporteras vidare i sprickor i det omgivande berget.

Gastransport har studerats i Lasgitförsöket /21-15/ i Äspölaboratoriet. Lasgit är ett fullskaleförsök med KBS-3V-geometri för att studera effekten av gastransport i bentonitbufferten, se avsnitt 24.2.7. Gas började injekteras i Lasgit under våren 2007. Detta skulle kunna ge preliminära resultat om hur gasuppbyggnads- och transportprocesserna går till. Eftersom bentonitbufferten inte har nått sitt jämviktstillstånd, måste emellertid resultaten från den första försöksserien behandlas med viss försiktighet.

Hur gas transporteras i de tekniska barriärerna i ett förvar för medelaktivt avfall har studerats i fältskala i Gas Migration Test (GMT) /21-16/. Försöket startade år 1997 i Nagras underjordslaboratorium i Grimsel. Fälttesterna avslutades år 2004 och det mesta av utvärderingarna och modelleringarna är också avslutade. Testet utfördes i en för ändamålet uppbyggd betongsilo med en bentonit/

sandbarriär försedd med gasventil. Två faser med gastester genomfördes i GMT. Före, mellan och efter gastesterna gjordes hydrauliska tester för att se om egenskaperna hos de tekniska barriärerna förändrades på grund av gasgenombrotten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Följande slutsatser har kunnat dras från GMT-försöken i Grimsel:

- Gas kunde transporteras genom ventilen till geosfären med relativt höga flöden och låga övertryck.
- Funktionen hos bentonit/sandbarriären påverkades inte negativt av gasen. Ingen förändring av de hydrauliska egenskaperna kunde detekteras.
- Vattenvolymen som trycktes ut från silon under gastesterna var mycket liten (10–13 liter, cirka en procent av den totala gasmängd som injekterades).

Program

Betongens vattenmättnadsgrad kan påverka dess frysegenskaper och därmed barriärernas funktion. Det är därför av intresse att ta reda på hur vattenmättnadsgraden förändras över tiden, genom processerna tvåfasflöde och gastransport, samt frysningskonsekvenserna av fullt vattenmättad betong. Programmet är kopplat till programmet för Vattenmättnad, se avsnitt 21.1.5.

21.2.6 Expansion/kontraktion

Det finns ett antal processer som skulle kunna påverka betongbarriärerna och i värsta fall leda till sprickbildning i dessa. Volymökning av avfallsmatriser och avfallskollin till följd av vattenupptag i jonbytarmassor konditionerade i bitumen och bildning av volymexpanderande korrosionsprodukter, kan orsaka spänningar i omgivande betongbarriärer om inte tillräcklig tomvolym finns tillgänglig för att ta upp denna volymökning, se avsnitt 20.2.6. Även volymökning på grund av korrosion av armeringsjärn kan orsaka inre spänningar. Uppbyggnad av inre gastryck samt sättningar och rörelser i de olika barriärerna, är andra mekanismer som med tiden kan orsaka sprickor i betongbarriärerna. Konsekvenserna av denna typ av mekanisk påverkan har inte analyserats i detalj och det kan inte uteslutas att de på sikt kan bidra till sprickbildning i betongbarriärerna.

Program

Delar av den forskning som SKB avser att bedriva inom detta område ryms inom ramen för det initierade projektet Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad betong, som beskrivs under avsnitt 21.2.10.

Armeringskorrosion kan bidra till förändrade mekaniska egenskaper hos betongbarriärerna och det kan därför vara av intresse för SKB att studera denna inverkan och hur den utvecklas över tiden.

21.2.7 Sprickbildning

Sprickbildning i betongen kan orsakas av en rad olika processer, bland annat expansion/kontraktion (avsnitt 21.2.6), frysning (avsnitt 21.2.3) och kemisk betongdegradering (avsnitt 21.2.10).

De reaktionsprodukter som bildas då armeringsjärn i betongstrukturerna korroderar, kan leda till sprickbildning i betongen närmast armeringen. Korrosionsprodukter har större volym än det ursprungliga stålet, vilket orsakar ett tryck från korrosionsprodukterna på omgivande betong /21-17/. Detta är ett välkänt fenomen som man bör ta hänsyn till vid dimensioneringen av tjockleken på täcksiktet av betong över armeringen. Denna mekanism förväntas inte leda till genomgående sprickor i betongstrukturerna.

Upplösning av salt från industarkoncentrat kan frigöra klorider, karbonater och sulfater som i sin tur kan reagera med omgivande betongbarriärer, se avsnitt 20.2.9.

Sprickbildning kan i sin tur påverka konduktiviteten, vattenflödet och transporten av lösta ämnen, vilket behandlas i avsnittet om vattentransport (21.2.4) och i avsnitten 21.2.14 och 20.2.14 som handlar om advektion och blandning.

Program

Sprickbildning studeras inom ramen för projektet Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad betong, se avsnitt 21.2.10. Det kan komma att bli aktuellt med ytterligare studier som beskriver korrosionsprodukters inverkan på eventuell sprickbildning i konstruktionsbetongen i SFR.

Studier av utfällning av sekundära faser och deras inverkan på självläkning av sprucken betong är av intresse, eftersom utfällningar kan tänkas leda till att uppkomna sprickor i betongen täpps igen och därmed minskas transporten ut ur förvaret via sprickor i betongen.

Programmet är kopplat till programmet för sprickbildning i avfallet, se avsnitt 20.2.7.

21.2.8 Bergutfall

När bärförmågan hos framför allt bergbultarna har avtagit, kan man förvänta sig att bergblock lossnar och faller in i bergsalarna. Denna process kan fortsätta till dess ett naturligt stabilt valv bildas kring bergsalen eller över flera bergsalar. Med hjälp av en styv återfyllning kan ett mottryck skapas, vilket minskar omfattningen av det uppluckrade området kring bergsalarna.

I ett helt tomt bergtrum pågår troligen uppluckringen till dess att bergtrummet helt fyllts med nedfallna block så att ett mottryck mot kvarvarande berg bildas. Hur lång tid uppluckringsprocessen pågår innan stabila förhållanden erhålls, är svårt att bedöma. Med ledning av erfarenheter från ras i övergivna gruvor bedöms det ta 50–150 år.

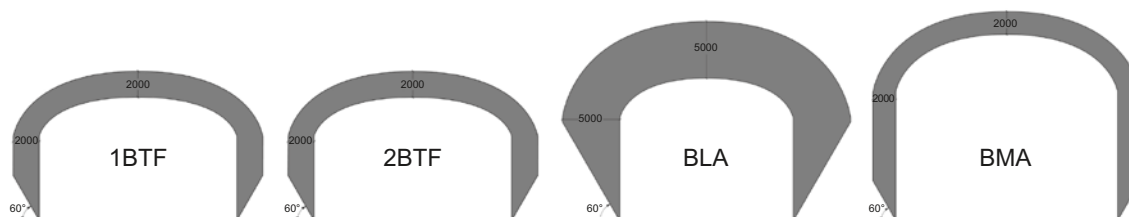
Med den utförda bergförstärkningen bedöms bergsalarna i SFR vara stabila under en tidsrymd av 200–250 år. Därefter sker en uppluckring av berget kring bergsalarna som bedöms pågå i 50–150 år tills stabila förhållanden fås. En konservativ uppskattning av största storleken på uppluckringszonerna framgår av /21-18/. Under förutsättning att BMA och BTF-förvaren återfylls med sand, beräknas zonen utbredning bli två meter medan uppluckringszonen runt BLA beräknas bli fem meter om bergsalen inte återfylls /21-19/. Storleken och formen på uppluckringszonen kan variera med cirka 50 procent beroende på variation i bergkvalitet och sprickornas riktning i förhållande till bergsalarna, se figur 21-3.

Bergutfall förändrar geometrin på förvarsutrymmena, se avsnitt 21.1.2. Bergutfall påverkar även vattenflödet, se avsnitt 21.2.4.

Program

I planerna ingår att ta fram modeller som beskriver konsekvenserna av eventuella bergutfall med avseende på korskontamination av radionuklider och andra material mellan olika bergsalar. Särskilt intressant är det att studera denna eventuella korskontamination mellan BLA- och BMA-förvaren.

Området bedöms kräva mer forskning gällande bergutfalls inverkan på hydrovariabler samt bergutfalls inverkan på de mekaniska spänningarna i barriärerna.



Figur 21-3. Bilden visar att för bergsalar som återfylls med sand (BMA och BTF) förväntas uppluckringszonen (skuggad) generellt bli cirka två meter. Den uppluckrade zonen runt BLA har beräknats till cirka fem meter om ingen återfyllnad sker av BLA /21-19/.

21.2.9 Upplösning/utfällning

Kemiska föreningar i de tekniska barriärerna kan reagera med varandra och med ämnen som lösts upp från avfallet och dess matriser. Dessa reaktioner kan bidra till att vissa ämnen faller ut och immobiliseras. Omvänt kan detta leda till att ämnen löses upp och görs tillgängliga för transport. Vilka reaktioner som sker och vilka jämvikter som ställer in sig i barriärerna, beror på koncentrationen av ingående ämnen i barriärerna samt lösta ämnen från avfallet och dess matriser.

När ämnen i avfallet och dess matriser degraderar kan det bildas lösliga ämnen, som därmed är tillgängliga för transport ut ur förvaret. Ämnen kan fällas ut på mineral i betongen och dess koncentrationer i lösning kan därmed påverkas. På samma sätt gäller att mineralfaser i betongen kan lösas upp och fällas ut och påverka koncentrationerna i lösning. De lösta ämnen som kan bilda joner i lösning kan komma att påverka vattnets jonstyrka, vilket i sin tur kan påverka sorptionen av radionuklider på betongen. Eftersom koncentrationen av lösta ämnen härrörande från avfallsnedbrytningsprodukter inte ännu är känd, kan dess påverkan på jonstyrkan inte kvantifieras. Jonstyrkan i cementporvattnet bestäms främst av pH och koncentrationen av Ca(II).

Program

SKB planerar att närmare studera korrosion och nedbrytningsprodukters inverkan på barriärerna för att studera hur barriärernas sorptionskapacitet förändras över tiden.

Ett program har initierats i Äspölaboratoriet där avfall ska gjutas in i betong. Ett delmål för projektet är att studera hur betongens kemiska och mekaniska egenskaper påverkas av nedbrytningsprodukter från avfallet.

Insatser inom detta område beskrivs även i avsnitt 21.2.10.

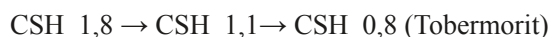
21.2.10 Kemisk cement- och betongdegradering

Den kemiska utvecklingen tillsammans med den mekaniska utvecklingen av förvaret är av betydelse för att bedöma beständigheten av de tekniska barriärerna i förvaret, med avseende på frigörelsen av radionuklider och andra specier och speciellt för sorptionen.

Beständigheten hos de tekniska barriärerna påverkas av kemiska reaktioner som sker när barriärerna kommer i kontakt med grundvattnet /21-1, 21-20, 21-22/.

Betong- och bentonitbarriärerna i SFR förändras med tiden till följd av ett antal kemiska processer. Porvattnet i betongen kommer till en början att ha pH över 13, på grund av koncentrationen av KOH och NaOH. Interaktion mellan betong och grundvatten leder till utlakning av i första hand lösliga alkalihydroxider, och i andra hand kalciumhydroxid (portlandit) som är en viktig beståndsdel i cementpastan i betongen. När portlanditen lakas sjunker pH i porvattnet till cirka 12,5. Efter urlakningen av portlanditen startar en inkongruent upplösning av kalciumsilikathydratfaser (CSH), och pH i porvattnet sjunker ytterligare till 10,5. Således leder lakningsförloppet till en successiv sänkning av pH i porvattnet i betongen.

Sammanfattningsvis degraderar kalciumsilikathydratfaserna enligt följande schema:



CSH är den engelska förkortningen för kalciumsilikathydrat och siffran efter CSH står för förhållandet mellan Ca och Si. Kalcium/silikatförhållandet sjunker således vid utlakning.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och granskningen av dessa

I kompletteringen av Fud-program 2007 konstaterades det att studier kring betong- och bentonitdegradering ingår i SKB:s program.

I granskningen av kompletteringen av Fud-program 2007 uttryckte SSM att de ser positivt på att SKB initierat ett projekt som syftar till att öka kunskapen om nedbrytningen av cement respektive betong under lång tid.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

En ny studie kring kemisk degradering av betongbarriärerna i SFR har tagits fram /21-20/. Studien bygger på en termodynamisk modell för de olika stadierna av betongdegradering. Dessutom hanterar modellen ett längre tidsperspektiv (tiden efter permafrost) än tidigare modeller. I studien ingår även hur varierande porositet i betongen påverkar den långsiktiga säkerheten.

Program

SKB har under 2009 initierat två omfattande projekt för studier av egenskaperna hos cement och betong och deras interaktioner med omgivningen och ingjutet avfall. Dessa projekt, för vilka båda det experimentella arbetet kommer att inledas under 2010, fokuserar på olika tidshorisonter och kommer att genomföras på olika sätt.

Projektet Långtidsbeständighet hos cement genomförs som ett internt SKB-projekt med den huvudsakliga experimentella verksamheten förlagd till Äspölaboratoriet och cementlaboratoriet på Ringhals kärnkraftverk. Utöver detta kommer en del verksamhet kring modelleringar av kemiska förlopp att genomföras, men fokus ligger dock på den experimentella delen. De huvudsakliga målen med projektet inkluderar studier av interaktionen mellan betong och cement av olika slag och bentonit eller ingjutet avfall. Undersökningar av hur en pH-plym kan utvecklas i berggrunden kring provkroppen ingår också som en möjlighet, men är inte huvudsyftet med studien.

Projektet Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad betong genomförs som ett doktorandprojekt i samarbete med Chalmers. Syftet med projektet är att få en ökad förståelse kring de kemiska och mekaniska egenskaperna hos åldrad betong och implementera denna kunskap i kommande säkerhetsanalyser för SFR och SFL. Detta projekt har som huvudmål att studera egenskapsförändringar i ett långt tidsperspektiv, upp till 100 000 år, dels genom modelleringar, men huvudsakligen med experimentella metoder genom att på olika sätt försöka tillverka cement med en åldrad struktur och sedan undersöka dess egenskaper. Projektet förväntas pågå under hela den kommande Fud-perioden och förhoppningen är att de erhållna resultaten ska kunna användas i den framtida säkerhetsanalysen för SFL.

Utöver de ovan beskrivna stora projekten planerar vi även att, med början under år 2010, inleda studier av gasgenomsläpplighet hos betong. Ytterligare insatser relaterade till denna process beskrivs i avsnitt 21.2.9.

21.2.11 Korrosion

Syret som finns i förvaret vid förslutning, kommer att lösas i det inträngande grundvattnet. Detta syre kommer snabbt att förbrukas genom bland annat korrosion av stål i behållare och armeringsjärn, oxidation av löst järn(II) och sulfid i vattnet samt mikrobiella processer. En låg redoxpotential kommer att bibehållas i de olika förvarsdelarna genom att Fe(II)-joner frigörs vid anaerob stålkorrosion och från korrosionsprodukter. Korrosionsprodukterna från järn kan bidra till att buffra redoxförhållandena.

Forskningsprogrammet för denna process beskrivs i avsnitt 20.2.12.

21.2.12 Sorption

Sorption av radionuklider är en av de viktigaste fördröjande säkerhetsfunktionerna i SFR. Sorptionen sker huvudsakligen på cementen i barriärerna och avfallsmatrisen, och beror på den kemiska sammansättningen hos vattnet i förvaret. En förutsättning för god sorption är att den kemiska miljön är gynnsam för detta.

Sorption av radionuklider förväntas i samtliga förvarsdelar och i det omgivande berget. Den största potentialen för sorption har dock de förvarsdelar som innehåller cement i betongväggarna, kringjutningen eller avfallskollina.

Vikten av säkerhetsfunktionen sorption i betongbarriärer är starkt kopplad till kemiska egenskaper hos individuella radionuklider. Vissa nuklider kommer inte att sorbera under några förhållanden och där gäller säkerhetsfunktionen inte alls. De flesta radionuklider kan dock antas sorbera mycket

starkt under de förhållanden som råder i SFR. För många radionuklider är sorptionen kopplad till den kemiska miljön i förvaret. De olika nukliderna kommer dock att påverkas på olika sätt av den kemiska miljön.

I allmänhet sorberar katjoner bäst vid högre pH, medan det motsatta förhållandet gäller för anjoner. I naturliga vatten, där organiska ligander och karbonat förekommer, är det dock inte säkert att sorptionen ökar med pH eftersom dessa ligander binder katjoner och därmed minskar dess sorption. Komplexbildningen ökar också med pH. Den kemiska miljön i cementporerna, högt pH och höga kalciumhalter, gör att karbonathalten med nödvändighet blir låg, eftersom den regleras av kalcit-jämvikten. Höga halter fritt karbonat skulle annars kunna bidra till en ökad radionuklidtransport ut ur förvaret. Höga pH-värden och höga kalciumhalter håller på samma sätt nere halten av ett flertal andra ligander, som oxalat. Andra ligander, som till exempel α -isosackarinat, sorberar till cement, möjligen genom komplexbildning med kalciumrika fasta faser. Inverkan av tillsatserna i cement på sorption (cement och granit) har studerats gemensamt av SKB, Nagra, Numo och Posiva /21-23/.

En del av radionukliderna är redoxkänsliga och för vissa är sorptionen avsevärt svagare vid oxiderande förhållanden. En låg redoxpotential i de tekniska barriärerna förväntas bibehållas genom närvaron av metalliskt järn och organiskt material. Sorptionen för U, Pu, Np och Tc minskar avsevärt vid oxiderande förhållanden.

Organiska ämnen från nedbrytning av avfallsformen (särskilt cellulosa) kan bilda komplex med radionukliderna och på så sätt konkurrera med sorptionen på de fasta ytorna. Det är viktigt att hålla mängden komplexbildare på låga nivåer. Den mest betydelsefulla organiska komplexbildaren är isosackarinat, se avsnitt 20.2.10 /21-22/.

Sorption sker nödvändigtvis på fasta fasers ytor. Cement har en relativt stor porositet och flera av de fasta faser som cement består av är amorfa och har en stor specifik yta, vilket gynnar sorption. De flesta av cementens fasta faser omvandlas med tiden, varvid sorptionskapaciteten kan förändras. Degradering av cement som resulterar i utfällningar som minskar porositeten, kan också bidra till en minskning av sorptionskapaciteten.

Sammanfattningsvis har cement, genom sina unika kemiska egenskaper, visat sig vara utmärkt för att hålla nere halten av ligander som kan hindra sorptionen av ett flertal radionuklider. Så länge portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) finns i cementen kommer pH i cementporvattnet att vara cirka 12,5. När portlanditen har lakats ur kommer pH successivt att sänkas till 10,5. Förändrat pH ändrar specieringen av radionukliderna samt bildandet av metallorganiska komplex, vilket påverkar sorptionsegenskaperna.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 och granskningen av dessa

I Fud-program 2007 beskrevs hur osäkerheterna hos olika radionuklidernas sorptionskoefficienter i betong, bentonit och sand/grus har uppskattats och bestämts. Dessa data gäller ännu och presenterades i SAR-08. Vidare beskrevs pågående studier rörande komplexbildning av radionuklider med organiska nedbrytningsprodukter så som cellulosa. Dessa studier pågår ännu och har utökats, se nedan.

Program

SKB:s forskning inom området riktar sig till att försöka modellera sorptionen av de för säkerhetsanalysen viktiga nukliderna i närvaro av organiska komplexbildare. Syftet är att få fram en modell där nya komplexbildande kemikaliers lämplighet för deponi i SFR snabbt kan bedömas.

Andra studier av vikt är att utvärdera sorptionsegenskaperna hos åldrad cement. Den kemiska sammansättningen hos åldrad cement kan modelleras med termodynamiska beräkningar, till exempel med PhreeqC-programmet /21-20/. Förhoppningen är att, utifrån denna kunskap, få fram nya sorptionskoefficienter för cementens olika åldringsstadier. Detta kan i sin tur leda till ökad kunskap om partiellt degraderade barriärers sorberande egenskaper, och hur dessa egenskaper påverkar framtida radionuklidutsläpp från förvaret.

När radionuklider transporteras ut genom betongen, antingen som hydroxidkomplex eller metallorganiska komplex, kommer de att påverkas av en ständigt förändrad kemisk miljö på grund av att inträngande grundvatten förändrar den kemiska sammansättningen hos betongen på olika djup i betongstrukturen. Denna förändrade miljö påverkar specieringen och lösligheten hos de olika radionukliderna. Hur detta påverkar retardationen av radionuklider kan komma att bli föremål för vidare modelleringsutredningar.

Vidare pågår ett arbete vid Chalmers där nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet UP2 (en polyakrylonitril-baserad polymer) studeras med avseende på dess inverkan på sorptionen av Cs(I), Co(II) och Eu(III).

21.2.13 Diffusion

Lösta ämnen kan transporteras i stillastående porvatten genom diffusion. Processen leder till omfördelning av lösta ämnen i porvattnet och påverkar alltså porvattensammansättningen, se avsnitt 21.1.8.

Diffusionsprocessen är starkt sammankopplad med nästan alla kemiska processer i de tekniska barriärerna, genom att den svarar för fram- och borttransport av reaktanter och reaktionsprodukter. Därmed är diffusion en central process för hela den kemiska utvecklingen och transporten av radionuklider i barriärerna.

I intakt betong är konduktiviteten så låg att diffusion är den dominerande transportmekanismen. Betong är dock inte ett självläkande material på samma sätt som bentonit och det går inte att utesluta att det finns sprickor i betongväggarna, vilka skulle kunna dominera masstransporten.

Baserat på de beräkningar som har utförts avseende lakning av betong, förväntas inte betongkokiller och cementmatriser bli utsatta för signifikant lakning av cementkomponenter under åtminstone 1 000 år i BTF och 10 000 år i BMA /21-1, 21-20, 21-21/. För silon förväntas ingen signifikant förändring under de första 100 000 åren /21-20/.

I porösa medier påverkas diffusionshastigheten av sorptionen, se avsnitt 21.2.12.

Program

När betongen åldras kommer dess diffusionspåverkande egenskaper att förändras och diffusionen kommer därför att skilja sig åt jämfört med "färsk" betong. Detta påverkar hastigheten av uttransport av radionuklider, varvid det är viktigt för SKB att ta reda på diffusionshastigheten i åldrad betong för relevanta ämnen. Detta kommer att studeras på betong i olika åldringsstadier inom ramarna för projektet Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad betong, se avsnitt 21.2.10.

21.2.14 Advektion och blandning

Transporten av lösta ämnen antas kunna ske både advektivt och diffusivt genom de tekniska barriärerna. Initialt antas den diffusiva transporten vara dominerande i betongbarriärerna och den advektiva transporten försumbar. När betongen degraderas kommer sprickor att uppstå och advektionen öka.

Program

När betongen åldras ändras dess kemiska och mekaniska egenskaper. Dessa förändringar kan leda till att storleken på det advektiva vattenflödet förändras med tiden. Ett förändrat vattenflöde till följd av detta kan påverka hastigheten av radionuklidtransporten, varvid det är viktigt att utreda konsekvenserna av detta för att få en ökad förståelse kring radionuklidtransporten ut ur förvaret i den åldrade betongen.

21.2.15 Kolloidbildning/kolloidtransport

Denna process beskrivs i avsnitt 20.2.15. Se även 24.2.20, 24.2.28, 25.2.18, 25.2.19.

21.2.16 Mikrobiell aktivitet

Denna process beskrivs i avsnitt 20.2.16. Se även avsnitt 25.2.16.

21.3 Modellering av radionuklidtransport för SFR

I nedanstående text beskrivs hur processer i barriärerna kopplas samman med transporten av radionuklider och hur modeller för radionuklidtransport kommer att utvecklas för SFR-förvaret.

21.3.1 Processer som påverkar radionuklidtransport

Flera processer påverkar transport av radionuklider i och från förvaret. Transport sker med advektion och dessutom sker dispersion och blandning. I förvarsdelar med liten vattenströmning, till exempel inne i avfallsbehållare eller inne i facken i silon eller i BMA, förväntas diffusion vara den viktigaste transportmekanismen. Sorption är den viktigaste fördröjande mekanismen. Koncentrationen av olika radioaktiva ämnen har i tidigare säkerhetsanalyser ansetts vara för låg för att göra fällning till en viktig fördröjande funktion, om man bara ser till radionuklidkoncentrationen. Däremot är medfällning med icke radioaktiva ämnen sannolikt en viktig fördröjningsprocess. I de cementrika miljöerna i förvaret är kalciumhalten hög, vilket motverkar bildning av kolloider /21-24/. Kolloidtransport har i tidigare säkerhetsanalyser inte ansetts vara aktuell i dessa delar av förvaret, då halten Ca(II) i grundvattnet är tillräckligt hög för att förhindra kolloidbildning. Den kemiska, mekaniska och mikrobiella nedbrytningen av bitumen påverkar frigörelsen från bitumenavfallet. Radionuklider i gasform som inte löses i vattnet, kommer att transporteras som gas och med mycket liten fördröjning.

Förutom dessa finns det flera olika processer som påverkar radionuklidtransport och som hanteras av koder som används för säkerhetsanalysberäkningar. I efterföljande avsnitt presenteras hur de identifierade processerna hanteras vid radionuklidtransportmodellering, baserat på de processbeskrivningar som finns presenterade i avsnitt 20.2 och avsnitt 21.2.

21.3.2 Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007

Omfattande beräkningar av radionuklidtransport för SFR utfördes inom säkerhetsanalysprojektet SAR-08 /21-18/. Grunden för dessa (elementuppdelning samt den ingående hydrogeologiska modellen) var de transportberäkningar som utfördes i SAFE /21-25/ men beräkningsmodellerna implementerades i ett annat beräkningsprogram och tiden för beräkningarna utökades så att påverkan av klimatförändringar kunde inkluderas i analysen. Efter SAR-08 har utvecklingsarbetet fortsatt och SKB har numera en fungerande modell i Ecolego, där både mer komplicerade och mer förenklade transportmodeller analyserats.

21.3.3 Program för beräkningskoder för radionuklidtransport

Den beräkningskod som avses användas för probabilistiska radionuklidtransportberäkningar inom projekt SFR-utbyggnad är Ecolego. Koden har i beräkningar som utförts efter SAR-08, visat sig vara lämplig för att lösa de aktuella problemen och bör matematiskt kunna hantera de processbeskrivningar som tas fram inom det forskningsprogram som beskrivs i avsnitt 20.2 och avsnitt 21.2.

Förutom detta planeras en utredning om behovet av att modellera närområdestransport i en kod som möjliggör en högre rumsupplösning, och en mer detaljerad modell för transport och flöde i bergsalar kan komma att tas fram. För detta kan multifysikprogram, exempelvis Comsol Multiphysics, användas där olika processer kopplas samman på ett mer komplext sätt än som gjorts i de kompartmentbaserade koder som använts i tidigare säkerhetsanalyser för SFR. Syftena med de nya modellerna är att bättre kunna utvärdera återfyllnads- och förslutningsalternativ samt bättre analysera effekten av sprickor i närområdet, degraderade barriärer, kortslutning mellan olika förvarsdelar, ändrade grundvattenflöden samt att få en ökad förståelse för olika parametrars påverkan på resultatet.

22 Bränsle

Det använda bränslet, som ska deponeras i förvaret, kommer från kärnkraftverken. Baserat på kärnkraftverkens planering för driften har mängden BWR-och PWR-bränsle som ska deponeras uppskattats till strax under 12 000 ton. 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 till 60 megawattdygn per kilo uran (MWd/kgU). Skillnader i radionuklid-innehåll mellan PWR- och BWR-bränsle är marginella sett ur ett säkerhetsanalysperspektiv. Mox-bränsle har högre resteffekt än uranbränsle, vilket medför att mindre mängder kan deponeras i varje kapsel. När det gäller att bedöma kriticitet blir skillnaderna mellan olika bränsletyper mer betydelsefulla.

22.1 Initialtillstånd

22.1.1 Variabler

För säkerhetsanalysen SR-Site beskrivs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller bränslet och hålrummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. Variablerna definieras i tabell 22-1.

22.1.2 Totalt radionuklidinventarium

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 nämndes att nya beräkningar kan komma att krävas med tanke på utbränningshöjningen eller nya bränsletyper. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram av myndigheterna.

Tabell 22-1. Variabler i bränslet.

Variabel	Definition	Kommentar
Geometri	Geometriska mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och Zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Strålintensitet	Intensitet av α -, β -, γ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hålrum.	Inget program. Ej relevant (initialt intakt kapsel).
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar.	Avsnitt 22.1.2
Gapinventarium	Förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser.	Avsnitt 22.1.3
Materialsammansättning	De material som bränsleelementets olika delar består av, <i>exklusive radionuklider</i> .	Avsnitt 22.1.4
Vattensammansättning	Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hålrum.	Se Gassammansättning, avsnitt 22.1.5
Gassammansättning	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hålrum.	Avsnitt 22.1.5

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Nya inventarieberäkningar har gjorts inför SR-Site. Det beräknade radionuklidinventariet baseras på kunskap om nu existerande använt bränsle samt en prognos om mängder och typer av använt bränsle som kommer att finnas år 2045 (det år då det sista kärnkraftverket tas ur drift enligt prognosen). Inventariet i det använda bränslet beräknades med koden Origen-S. Inventariet för aktiveringsprodukter i övrigt material beräknades med koderna IndAct and CrudAct. Resultaten av dessa beräkningar redovisas inom ramen för Sr-Site.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.1.3 Gapinventarium

Under bestrålningen i reaktorn segregeras en viss andel av bränslets radionuklidinventarium till gapet mellan bränsle och kapsling och till korngränser i bränslet. Andelen av radionuklidinventariet som finns i gapet (gapinventariet) anses frigöras mycket snabbare än andelen som är inbäddad i bränslematrisen. Det är därmed viktigt för att uppskatta så kallad snabbt frigjord andel av inventariet (som kan ge upphov till pulsutsläpp eller instant release fraction, IRF). Fissionsgaser (till exempel Kr eller Xe) är mobila och deras beteende är relativt välkänt och dokumenterat i ett antal publicerade studier. En andel av fissionsgaserna segregeras under drift och återfinns efter drift i gapet mellan bränslematris och kapsling. Den frigjorda andelen fissionsgaser mäts efter drift vid punktering av bränslestavar och kallas fissionsgasfrigörelse (eller fissionsgasutsläpp).

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI anser att SKB behöver se över underlag och motivering för gapinventariet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Vissa mobila fissionsprodukter beter sig likt fissionsgaserna och deras segregation anses allmänt vara jämförbar med fissionsgasfrigörelsen. Andra radionuklider som kan segregera är främst den andel av bränsleinventariet som är inkompatibel med UO₂-matrisen /22-1, 22-2, 22-3, 22-4/.

Analysen av data för andelen av radionuklidinventariet som segregeras till gapet mellan bränsle och kapsling eller i korngränser som gjordes inför SR-Can /22-5/ baserades på bränsle med medelutbränning 38 megawattdygn per kilo uran (MWd/kg U) samt ett mycket begränsat antal bränsleelement med utbränning över 50 MWd/kg U. Med hänsyn till planerna på ökad utbränning för framtida BWR- och PWR-bränsle upp till 60 MWd/kg U tas en ny uppskattning av gapinventariet fram inom projektet SR-Site.

Det finns endast en begränsad mängd data för fissionsfrigörelse från BWR-bränsle med utbränning högre än 50 MWd/kg U /22-6/. Den befintliga datamängden för högutbränt (50–60 MWd/kg U) PWR-bränsle är något större /22-5, 22-3, 22-4/. Med hänsyn till den begränsade mängden data för bränsle med utbränning upp till 60 MWd/kg U, har fissionsgasfrigörelse beräknats för typiska svenska BWR- och PWR-bränslen /22-7, 22-8/. Dessa beräkningar beaktar effektuttaget, eftersom effektuttaget påverkar fissionsgasfrigörelsen mer än bränslets utbränning /22-9/, även om de två ofta är relaterade. Planeringen för ökat effektuttag i svenska reaktorer medför en förväntad ökning av fissionsgasfrigörelse i framtiden.

För bränsle från lättvattenreaktorer finns det fler systematiska studier av frigörelse av fissionsgaser än av andra segregerade radionuklider (till exempel Cs, I, Sr) /22-10, 22-11, 22-3, 22-12/. En studie av frigörelse av segregerade radionuklider från fyra PWR bränslesegment med hög utbränning (55–75 MWd/kg U) har delvis rapporterats /22-13/ och fortsätter i samarbete med Nagra och PSI (Schweiz).

Program

Studien av utsläpp av segregerade radionuklider från bränslesegment från PWR och bränslefragment med hög utbränning och uppmätt fissionsgasfrigörelse fortsätter och kompletteras med analyser av andra radionuklider som till exempel I-129 eller Se-79. Resultaten diskuteras regelbundet och kommer att publiceras i samarbete med Nagra och PSI. På PSI genomförs radiokemiska analyser av C-14 och undersökningar av högutbränt BWR-bränsle, samt metodutveckling genom testning av en standardlösning med Se-79, vilket möjliggör bestämning av en detektionsgräns för analyserna.

22.1.4 Materialsammansättning

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Av de icke-radioaktiva fissionsprodukterna är barium av intresse eftersom samfällning av radium med barium kan leda till minskade doser. Vikten av att studera detta vidare betonades i granskningen av Fud-program 2007.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Inventariet av isotoper, även icke-radioaktiva, har tagits fram genom arbete inom Bränslelinjen. Ur detta inventarium kan bariumhalten uppskattas. Mängden barium har bäring på främst uppskattningen av samfällning av radium med barium, se avsnitt 22.2.7.

Program

Ny litteraturstudie av samfällning Ra-Ba sulfat diskuteras, se avsnitt 22.2.7.

22.1.5 Gassammansättning

Vatten i kapselns hålrum förekommer initialt som ånga och även variabeln Vattensammansättning behandlas därför i detta avsnitt.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Genom att byta ut luften i kapseln mot argon kan mängden radiolytiskt producerad salpetersyra begränsas. Med endast mycket lokala områden med dragspänningar kan risken för spänningskorrosionssprickning, som skulle reda till att kapselns hållfasthet minskades, uteslutas.

Däremot kan en kvarvarande mängd av 600 gram vatten i kapseln korrodera järnet och producera vätgas i en mängd som inte är försumbar. Undersökning av effekterna av vätgasuppbyggnaden på kapselkomponenternas materialegenskaper ingick i Fud-program 2007. Se även avsnitt 10.4.

Kärnavfallsrådet påpekar att tidsberoende fenomen, såsom till exempel vätetts påverkan på segjärn måste förklaras.

Nyvetenskap och program om vätetts påverkan på segjärn diskuteras i avsnitt 23.2.2.

22.2 Processer i bränsle/hålrum

En rad processer kommer över tiden att förändra tillståndet i bränslet och i kapselns hålrum. 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 stabila ämnen genom radioaktivt sönderfall och kärnklyvning. Processen ger upphov till alfa-, beta- gamma- och neutronstrålning som, genom växelverkan med själva bränslet och med omgivande material, dämpas och omvandlas

till värmeenergi. Genom värmetransport i form av värmeledning och värmestrålning ändras 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 alfa-strålningen ger upphov till, leda till brott på bränslets kapslingsrör.

I en intakt kopparkapsel kommer radiolys av restgaser i hålrummet 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 hålrum. Den kemiska miljön förändras därigenom radikalt. Genom radiolys av vattnet i hålrummet kommer den kemiska miljön att förändras ytterligare. Vattnet i kapseln orsakar korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar i bränslet. Om kapslingsrörens isolering skulle vara initialt bruten, eller brytas genom korrosion eller mekaniska påfrestningar, kommer bränslet i kontakt med vatten. Detta leder dels till upplösning av radionuklider som samlats på bränslematrisens yta, dels till upplösning eller omvandling av bränslematrisen och frigörande av radionuklider. Radionukliderna kan antingen lösas i vattnet och bli tillgängliga för uttransport eller falla ut i fasta faser i kapselns tomrum. Detta bestäms av de kemiska förhållandena i kapselns hålrum. Vid bränsleupplösningen kan också kolloider med radionuklider bildas.

Vattenlösta radionuklider kan transporteras med rörligt vatten i kapseln det vill säga 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 neutroner 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.

En del av de bränsleprocesser som ingår i säkerhetsanalysen SR-Site bedöms inte kräva något forskningsprogram. Dessa processer framgår av tabell 22-2.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de övriga processerna i bränslet.

22.2.2 Radioaktivt sönderfall

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 ingick inget forskningsprogram för detta område och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

De relevanta radionuklidernas halveringstider är generellt sett välkända. Se-79 är ett undantag, och dess halveringstid har diskuterats i litteraturen. Det senast publicerade värdet är $3,77 \times 10^5$ år /22-14/. Tidigare uppskattningar varierar mellan cirka 1×10^6 år och 1×10^5 år, se till exempel /22-15/. Det senast publicerade värdet på halveringstiden för Ag-108m är 438 år /22-16/. Detta skiljer sig endast obetydligt från det värde som användes i SR-Can (418 år).

Tabell 22-2. Bränsleprocesser som inte bedöms kräva något forskningsprogram. Processerna är inte kommenterade i granskningen av Fud 2007.

Värmetransport

Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation (se avsnitt 23.2.4)

Termisk expansion/kapslingsbrott

Advektion och diffusion (se avsnitt 24.3)

Restgasradiolys/syrabildning (se avsnitt 22.1.5)

Metallkorrosion

Lösning av gapinventarium

Program

SKB har inget 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 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 konstaterades det att konsekvenserna av ökad utbränning för den termiska utvecklingen borde utredas inför SR-Site. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Arbete inom Bränslelinjen samt inom projektet SR-Site har resulterat i nya beräkningar för den termiska utvecklingen i och kring kapseln. Stråldämpning och värmealstring från kapseln begränsas av kravet att ingen kapsel får avge mer än 1 700 watt (W). Utifrån detta krav väljs sedan bränsle-
innehållet i kapseln. Värmeutvecklingen i och kring en deponerad kapsel modelleras i SR-Site.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.2.4 Inducerad fission – kriticitet

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades nya beräkningar för att utreda konsekvenserna av gjutdefekter, samt för att studera kriticitet för Mox-bränsle.

I granskningen påpekade SSI att SKB bör utreda vad scenariot med buffererosion och kapselbrott innebär för risken för kriticitet.

SKI ansåg att ytterligare insatser krävdes på området för att visa att kriticitet på grund av förändrad geometri och omfördelning av radionuklider inte är en viktig process.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

De planerade nya kriticitetsanalyserna, vilka inkluderar defekta insatser samt Mox-bränsle, har utförts, se avsnitt 10.5.

Beräkningarna visar att k_{eff} är under 0,95 inne i en vattenfylld kapsel för alla typer av använt bränsle. Beräkningarna visar också, att ett obestrålrat modernt PWR bränsleknippe i en vattenfylld kapsel resulterar i k_{eff} över 0,95. Eftersom allt bränsle som ska placeras i kapslarna för deponering kommer att vara använt, det vill säga ha utsatts för bestrålning, är det mer realistiskt att ta hänsyn till utbränningen (burn-up credit) i dessa beräkningar. När hänsyn tas till effekter av utbränning, det vill säga minskad mängd U-235 och ökad mängd klyvningsprodukter, resulterar detta i k_{eff} under 0,95 även för PWR förutom vid mycket låg utbränning.

Effekten av en defekt insats resulterar i en något ökad k_{eff} , men beräkningarna visar att k_{eff} hamnar under 0,95 för använt bränsle.

Vid vatteninträning kan insatsen deformeras samt aktinider transporteras och deponeras utanför kapseln. Risken för kriticitet utanför kapseln har bedömts som mycket låg på grund av de osannolika händelseförlopp som måste antas för att kritiska förhållanden ska kunna uppstå utanför kapseln /22-17, 22-18, 22-19/. Detta har nyligen testats igen i /22-20/, som utvärderade risken för kriticitet i Yucca Mountain och bedömde den vara negligerbar.

Program

SKB, Posiva och Nagra planerar en serie workshops för att ytterligare utreda konsekvenser av förändrad geometri i kapseln på grund av deformation och omvandling av insatsen. Se även avsnitt 10.5.

22.2.5 Vattenradiolys

Radiolys av vatten i kapselns hålrum bildar oxidanter som har en inverkan på korrosion av bränsle och insats. Vattenkemin påverkar i sin tur mängden lösta oxidanter.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs resultat av undersökningar av järnkorrosion i initialt syrefritt vatten under gammabestrålning /22-21/. Inga vidare studier ingick i programmet och inga direkta synpunkter framfördes av myndigheterna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Små mängder upplöst vätgas har visat sig sänka halten producerade oxidanter i vattnet, om vätgashalterna i vattnet är över ett visst tröskelvärde /22-22/. Bränslelakning i närvaro av metalliskt järn resulterar i syrehalter under detektionsgränsen i autoklaven samt bildning av järnkorrosionsprodukter som magnetit och grönrost, vilka är typiska för strikt anoxiska förhållanden /22-23, 22-24/. Ingen radiolysgasbildning observerades i gammabestrålade 5 M NaCl lösningar som innehöll 0,85 mM upplöst vätgas /22-25/. Produktionen av radiolytiska gaser startade om vid tillsatts av bromidjoner i lösningen /22-26, 22-27/. Dessa studier visar att små mängder vätgas i vattnet håller nere mängden radiolytiskt producerade oxidanter, samt att bromid i vattnet kan motverka denna effekt genom att reagera snabbare än vätgasmolekylen med OH-radikalen.

Program

Studier av homogen alfaradiolys vid högre pH och närvaro av bromid planeras vid Chalmers.

22.2.6 Bränsleupplösning

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades lakningsförsök med högutbränt bränsle, samt försök med alfadopat material i närvaro av reduktanter. I programmet ingick samarbeten med KTH, Chalmers och ITU för bättre förståelse för mekanismer samt förbättring av modelleringen av processerna inom ramen för EU-projektet Micado.

I granskningen anser myndigheterna att SKB behöver genomföra experiment och studier av högutbränt bränsle med anledning av planer på att gradvis öka medelutbränningen av bränsle vid de svenska kärnkraftverken. SKB behöver demonstrera bränsleupplösningmekanismer genom modellstudier. Dessutom behöver SKB visa att man gjort en koppling mellan analyserna av bränsleupplösning och förvarets utveckling, eftersom till exempel bufferterosion även kan påverka förutsättningarna för bränsleupplösning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Med hänsyn till den förutsedda ökningen av medelutbränning av bränslet i framtiden, genomfördes en serie försök med högutbränt bränsle (medelutbränning högre än 50 MWd/kg U) under olika förhållanden.

I högutbränt bränsle bildas en så kallad HBU(High BurnUp)-struktur, eller *rim*, i yttre delen av bränslekutsen, i vilken kornstorleken är mindre än en mikrometer och mängden små porer (1–2 mikrometer) är hög. Denna struktur bildas eftersom neutroninfångning och Pu-bildning sker i yttre delen av kutsen, vilket ger lokalt mycket hög utbränning. HBU-strukturen förväntas ha en högre upplösningshastighet än resten av kutsen som en kombinerad effekt av ökad mängd fissionsprodukter och aktinider, porositeten samt den mindre kornstorleken.

Experiment med lakning av bränsleprover tagna från olika segment i en bränslepinne med varierande utbränning från 21 till 49 MWd/kg U /22-28/ visade på en svag och nästan linjär ökning av utlakningen (kumulativ frigjord andel) upp till 40–43 MWd/kgU för att därefter minska.

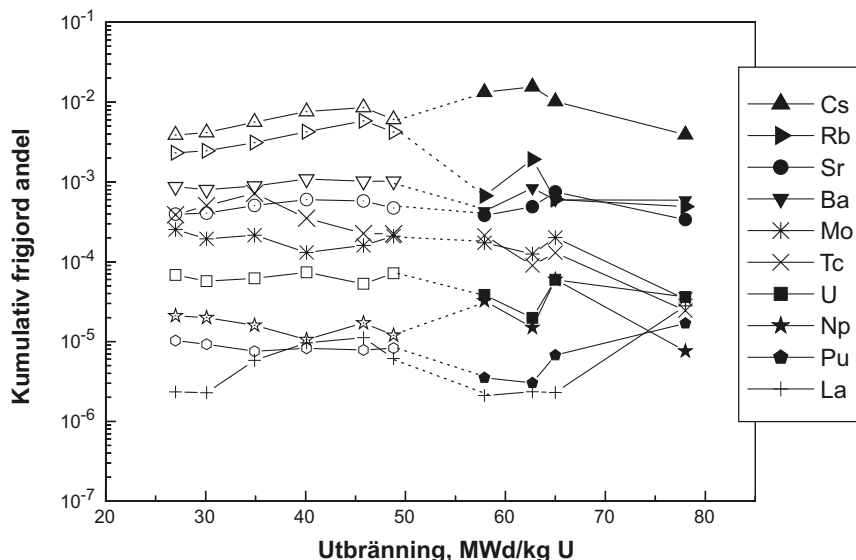
Denna studie har nu utvidgats med lakningsdata för fyra bränslesegment med hög utbränning (55–75 MWd/kg U). Resultaten för hela utbränningsintervallet visar att frigörelsen från bränslet inte ökar proportionellt med utbränning /22-13/. Högst kumulativ frigjord andel observeras för bränsle med medelutbränning, följt av en svag minskning av utsläpp från de högst utbrända bränslekutsarna, se figur 22-1.

I två andra systematiska studier med bränsleutbränning i intervallerna 29–60 MWd/kg U /22-29/ eller 15–70 MWd/kg U /22-30/ görs liknande observationer.

I bränsleförsök genomförda under EU-projekt NF-Pro jämfördes utsläpp från den yttersta delen (cirka en millimeter, HBU-struktur) av en högutbränd bränslekuts (medelutbränning 65 MWd/kg U) med utsläpp från centrala delen av kutsen. Bränsleproverna från båda delarna av kutsen var i form av pulver med liknande storlek på fragmenten. Lakningsförsöken visade att utsläpp av nästan alla radionuklider var lite lägre från yttersta delen. Liknande observationer har gjorts tidigare /22-31, 22-32/, och har tolkats som en effekt av den större mängd fissionsprodukter och andra icke-uran atomer (så kallade dopanter) som finns i högutbränd uranoxid. Dopanterna minskar upplösningshastigheten genom en yteffekt (när dopanterna är mindre lösliga eller har lägre upplösningshastighet) och en halvledareffekt, genom att ändra elektronöverföringsförmågan och därigenom minska oxidationen av uran.

Minskad upplösningshastighet av $UO_2(s)$ på grund av dopanter har observerats också i 1) försök med oxidativ upplösning av Gd-dopad $UO_2(s)$ /22-33/, 2) en elektrokemisk och spektroskopisk studie /22-34/ av simulerat bränsle (Simfuel) samt 3) upplösning av naturlig uraninit /22-35/. Termokemiska mätningar av UO_{2+x} innehållande olika mängder två- eller trevalenta oxider /22-36/ visar att de är mycket svårare att oxidera och/eller lösa upp än ren UO_2 på grund av den ökade stabiliteten av gittret som resulterar från det energetiska bidraget av dopanterna.

Högutbränt bränsle har också testats under reducerande förhållanden /22-37, 22-38/. Under hela försöket var aktinidhalterna mycket låga och i princip konstanta, medan utsläppet av Cs minskade med tiden.



Figur 22-1. Kumulativ frigjord andel från högutbränt bränsle /22-13/ (fyllda symboler) för en kumulativ tid av 182 dagar (fyra kontaktperioder) jämfört med liknande data från mindre utbränt bränsle /22-28/ (öppna symboler).

De första resultaten från lakning av Mox-bränsle under reducerande förhållanden /22-39/ visar ett liknande beteende som i försök med UO_2 bränsle under vätgasatmosfär. Försöksdata tyder på mindre utsläpp från områden i Mox-bränsle som innehåller Pu-agglomerat och har högre utbränning än resten av UO_2 -matrisen.

En sammanställning av nya experimentella studier av lakning av använt bränsle och ^{233}U - dopad UO_2 i närvaro av 0,05–43 mM upplöst vätgas har gjorts, där den kombinerade effekten av aktinidoxidor, adsorberat vatten och strålning har diskuterats /22-40/.

I lakningsförsök med använt bränsle kan upplösningshastigheten bedömas genom att analysera utsläpp av icke redox-känsliga fissionsprodukter. En systematisk minskning med mer än två tiopotenser av frigjord andel Sr eller Cs under olika tidsintervall observerades under de mer än ett år långa försöken. För längre lakningsperioder ökade antalet intervall där inget utsläpp av Sr eller Cs kunde mätas. 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 Np och Pu, mycket lägre än uranhalterna och aktinid- till uran-uranförhållandet ganska nära det i bränslet, trots att lösligheterna av deras fyrvärda oxider är relativt lika /22-40, 22-38, 22-39/. Detta tyder på en möjlig medfällning av uran med Np och Pu.

Bränslelakningsförsök som pågått 1–3 år i förslutna glasampuller med Ar-atmosfär visar att hastigheten för bränsleupplösningen sjunker och närmar sig noll när halten radiolytiskt producerad vätgas når storleksordningen 10^{-5} – 10^{-4} M. Dessa data kunde tolkas och modelleras genom att inkludera effekten av metalliska partiklar på vätgasreduktion av ytoxidat uran /22-41/.

Under förhållanden som råder i ett slutförvar de första tiotusen åren förväntas radiolytiskt producerade oxidanter att förbrukas av de höga halterna reduktanter (Fe(II) och vätgas) som bildas vid anoxisk järnkorrosion. Den residuella alfaaktiviteten i mycket gammalt bränsle, det vill säga efter de första tiotusen åren, förväntas bli så liten att det inte produceras tillräckligt med oxidanter för att orsaka en mätbar oxidation av bränslet /22-42, 22-43/. Ett gränsvärde för specifik alfaaktivitet motsvarande 18–33 MBq/g UO_2 i avjonat vatten (som har mycket låg redoxbuffringskapacitet jämfört med det geologiska mediet) har föreslagits utgående från experimentella data /22-44/. Detta betyder att för några tiotusen år gammalt bränsle, är de bränsleupplösningshastigheter som används i Sr-Site pessimistiska och jämvikt med $\text{UO}_2(\text{s})$ kan användas i stället.

I studier inom ramen för EU-projektet NF-Pro, som utförts med alfadopad urandioxid (som simulerar strålfältet från några tusen år gammalt bränsle), har lösningar med en miljondel (ppm) sulfid använts. Försöken utfördes både med och utan närvaro av metalliskt järn. Resultaten visar ingen mätbar effekt av vare sig alfadopningsnivå eller försökstid på uppmätta uranhalter. De halter uran som uppmättes i lösning eller vid analys av järnytor efter avslutat försök är mycket låga. Uppskattning av matrisupplösningshastigheten bekräftar tidigare resultat /22-45/. Försök med korrosion av alfadopade pellets under anoxiska eller reducerande förhållanden i salthaltiga lösningar (0,1–1 M NaCl samt (NaCa)Cl lösningar) visar att ingen effekt av alfaradiolys kunde observeras samt en något minskad upplösningshastighet med ökad jonstyrka /22-46/.

Effekten av närvaro av vätgas har undersökts i studier utförda i autoklav med UO_2 dopad med 10 procent ^{233}U , under olika vätgashalter, vilka visade U-halter som minskade med tiden och oxidanthalter i autoklaven under detektionsgränsen. Vid försöksavslut analyserades UO_2 -ytan med XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) vilket visade att UO_2 -ytan var reducerad /22-47, 22-48/.

Studier under Ar-atmosfär, vilka utfördes med relativt låg alfaaktivitet, visade mätbar men långsam ökning av halten U. Under senare tid har studier av UO_2 dopad med mycket högre alfaaktivitet genomförts. En UO_2 pellet med mycket hög dopningsnivå (385 MBq/g UO_2 , motsvarande cirka 50 år gammalt bränsle) visade en tydlig effekt av alfaradiolys under Ar-atmosfär, med U-halter som ökade snabbt i karbonatlösningar. Samma system testades under en bar H_2 vilket medförde en lätt minskning av U-halterna med tiden, i stället för ökning /22-43/. Under EU-projektet NF-Pro genomfördes även försök med pulver av högt dopad UO_2 (285 MBq/g, motsvarande cirka 150 år gammalt bränsle). Relativt höga halter U uppmättes vid start i lösningen, men de minskade lätt med tiden under vätgasatmosfär /22-49, 22-50/.

Ett antal studier har undersökt mekanismen bakom vätgasens påverkan på bränsleupplösningen, vilken har kopplats till den katalytiska effekten av metalliska ϵ -partiklar (innehållande fissionsprodukterna Mo, Pd, Tc, Rh och Ru) genom aktivering av vätgas på bränsleytan. Studierna visade att korrosionspotentialen av Simfuel-pellets minskade proportionellt med innehåll av ϵ -partiklar /22-51/ samt halten upplöst vätgas /22-52/ till värden väl under oxidationsgräns för $UO_2(s)$, vilket tyder på en komplett inhibering av bränslekorrosionen. SECM (Scanning ElectroChemical Microscopy) användes för att verifiera att dessa effekter beror på en reversibel splittring av upplöst H_2 på ϵ -partiklar /22-53/.

Den katalytiska effekten av metalliska Pd-partiklar på reaktionen av vätgas med väteperoxid och uranyl-joner studerades och resultatet visade att reaktionen är mycket snabb, praktiskt taget diffusionskontrollerad och oberoende av vätgastrycket i intervallet 1–40 bar /22-54, 22-55/. Påverkan av metalliska partiklar på bränsleupplösning har även studerats med UO_2 -kulsar innehållande olika mängder Pd-partiklar /22-56, 22-57/. Resultaten visar att metalliska partiklar katalyserar både oxidation av UO_2 med väteperoxid och reduktion av ytoxidat uran med upplöst vätgas. Resultaten visar också att reduktionen av oxiderat uran på uranoxidytan, i närvaro av vätgas, är väldigt snabb och att endast en ppm metalliska partiklar skulle räcka för att helt hindra upplösning av 100 år gammalt bränsle under 40 bar H_2 /22-57/.

Påverkan av upplöst vätgas på alfaradiolys i bulklösning har också modellerats med hänsyn till dosrat och närvaro av bikarbonat. Simuleringarna visar att effekten är starkt dosratberoende samt att påverkan av vätgas på radiolys i lösning är mycket mindre än den katalytiska effekten av metalliska partiklar på bränsleupplösning /22-58/. Metalliska partiklar extraherades selektivt från använt bränsle med ickeoxiderande reagens (fosforsyra i stället för salpetersyra), för att undvika upplösning av de mest aktiva metallerna och ändringar i sammansättningen. En lösning med oxiderade former av redoxkänsliga radionuklider såsom Se(IV), Tc(VII), U(VI), Np(V) och Pu (VI) visade sig vara stabil i närvaro av en gasblandning (Ar med 10 procent H_2), men i närvaro av metalliska partiklar som extraherats från bränsle reducerades nukliderna snabbt och fälldes ut från lösningen. För syntetiska metalliska partiklar märktes en något svagare katalytisk effekt, som förstärktes i närvaro av β -strålning /22-59/.

En modell har utvecklats för radiolytiskt inducerad bränsleupplösning som beskriver den geometriska alfa- och betadosfördelningen utifrån radionuklidinventariet i använt kärnbränsle /22-60/. Denna modell har använts för att simulera strålinducerad upplösning av bränsle när ytkoncentrationen av väteperoxid når nästan konstant nivå (så kallad steady-state) på grund av produktion och förbrukning med samma hastighet /22-61/. Resultaten av beräkningarna med steady-state modellen har med framgång använts till att modellera experimentella data från upplösning av 15 år gammalt bränsle /22-62/.

Studier av förändringar i kinetiken för reaktionen mellan väteperoxid, som är huvudprodukten av alfaradiolys, och UO_2 -suspensioner har gjort det möjligt att bestämma hur mycket väteperoxid som konsumeras innan ytan är mättad med oxiderat UO_2 . Detta ger ett mått på antalet positioner per ytenhet, som är tillgängliga för oxidation /22-63/. Påverkan av andra faktorer, som till exempel lösningens jonstyrka, i kinetiken för UO_2 -oxidation med väteperoxid i närvaro av olika karbonathalter har också studerats /22-64/. Gamma- och elektronstrålning användes för att framställa nanopartiklar av uranoxid, som visade hög aktivitet gentemot väteperoxidförbrukning, mestadels via katalytisk nedbrytning vid oxidytan /22-65/.

En studie av påverkan av olika reaktiva species, som Fe(II)- eller kloridjoner vid radiolytisk upplösning av UO_2 , genomfördes i närvaro av olika gasblandningar. Resultaten kunde modelleras med tidigare bestämda hastighetskonstanter och visar bland annat att närvaro av Fe(II)-joner minskar upplösningshastigheten för $UO_2(s)$ /22-66, 22-67/. Dessa experimentella studier har använts för att ta fram en modell för bränsleupplösning under förhållanden som råder i ett slutförvar, vilken tar hänsyn till den relativa betydelsen av radiolytiska oxidanter samt påverkan av reaktiva species i grundvatten såsom Fe(II)-joner eller upplöst vätgas /22-68/. Resultaten visar att bara 0,1 bar vätgastryck räcker för att helt bromsa upplösning av 100 år gammalt bränsle, medan det i närvaro av 40 μM Fe(II) räcker med bara vätgas från radiolys för att stoppa bränsleupplösningen.

Program

Under den kommande perioden planeras både insatser för att ta fram data angående bränsleupplösning under slutförvarsliknande förhållanden samt för att belysa mekanismen för de olika processerna som bidrar till bränsleupplösning.

Nya försök planeras med en autoklav som ska placeras i hotcell för lakning av större mängder bränsle än i tidigare lakningsförsök. Större mängder bränsle ger ökad känslighet i mätningarna. Försöken ska ske under H₂-atmosfär och för att undvika luftkontamination har en autoklav med mjukmetallpackningar och andra förbättringar inköpts och förberetts för användning i hotcell.

Med hänsyn till en ökning av medelutbränning för framtida bränsle, är lakningar med högutbränt bränsle (mer än 50 MWd/kg U) planerade att genomföras under olika förhållanden. Undersökningar av högutbränt bränsle ska fortsätta, både med hänsyn till matrisupplösningshastighet och utsläpp av den lättlösliga fraktionen från bränsle. Detta innebär också arbete med utveckling av lämpliga analysmetoder för att kunna analysera nuklider som Se eller I i laklösningar.

Nya långtidsförsök i förslutna glasampuller, där bränsle lakas i närvaro av karbonatlösningar, förbereds och ska analyseras efter längre tidsperioder för att erhålla nya data och bekräfta tidigare resultat.

Mekanistiska studier av upplösning av olika UO₂-material samt använt bränsle i närvaro av deuterium i stället för vätgas förväntas förbättra förståelsen av mekanismen för vätgaspåverkan. Studier av bränsleupplösning under vätgas med tillsats av till exempel Cr(VI) i lösning, förväntas förbättra förståelsen angående reduktion av oxiderade radionuklider.

För att undersöka hur bränsleupplösningen påverkas av uransorption på bentonitpartiklar i en skadad kapsel där bentonit har eroderat, ska en studie med toriumoxid och bentonitslam genomföras.

Studier som förbättrar förståelsen av mekanismer för de processer som sker under bränsleupplösning samt dess modellering ska fortsätta under perioden i samarbete med KTH. I samarbete med ITU har en mekanistisk studie påbörjats av de processer som sker vid bränslets yta genom att undersöka tunna skikt av aktinidoxider med spektroskopiska och elektrokemiska metoder. I samarbete med Uppsala universitet har en teoretisk modelleringsstudie påbörjats av interaktionen mellan radiolytiska oxidanter och UO₂-ytor.

I ett samarbete med Stockholms universitet inom det europeiska nätverket Delta-Min, ska yteffekter på uppmätta upplösningshastigheter studeras närmare. Studien syftar till att testa hypotesen att uppmätt upplösningshastighet beror på förändringar i provets ytmorfologi och antal positioner med högre upplösningspotential (high energy sites). Kopplat till detta planeras även ett internationellt projekt i samarbete med VTT, Posiva, University of Sheffield och Uppsala universitet.

22.2.7 Speciering av radionuklider, kolloidbildning

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades en litteraturstudie av samfällning av radium och barium. Studier av redoxkinetik hos olika oxiderade former av radionuklider på järnytor skulle fortgå.

I granskningen ansåg SKI det nödvändigt att medfällning av radium med barium studeras närmare.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

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.

En studie har visat att magnetit, som är den huvudsakliga korrosionsprodukten av järn under syrefria förhållanden, reducerar oxiderat U(VI) i lösning till amorf UO₂(s) vid den korroderade järnytan /22-69/. Röntgendiffraktion visade närvaro av amorf UO₂(s), medan XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) bekräftade närvaro av U(IV). Sorption av U(VI) på magnetitytor har studerats med spektroskopiska metoder, bland annat XPS och EXAFS (Extended X-Ray Adsorption Fine Structure) som visade att uran sorberat på magnetitytor finns både som U(VI) och U(IV) /22-70/.

En studie av interaktion mellan selen och järn och järnkorrosionsprodukter under syrefria förhållanden visade att både Se(IV) och Se(VI) kan immobiliseras genom reduktion som Se(0) och möjligen FeS₂ på järnytan /22-71/. Metalliskt järn reducerar Se(IV) mycket fortare än Se(VI), och reduktionen går fortare med korroderat järn. Påverkan av uranyljoner på reduktion av Se(IV) på magnetit- eller järnytor har också undersökts. Denna studie visade att närvaro av uranyl ökade reduktionshastigheten av selenat samtidigt som en reduktion av uranyl skedde /22-72/. I en annan studie simulerades de metalliska partiklarna i använt bränsle med Pd-partiklar i UO₂(s) och effekten på reduktion av Se(IV) i närvaro av vätgas undersöktes /22-73/. Resultaten visade att Se(IV) i lösning reducerades till Se(0) av H₂ i närvaro av Pd-dopad UO₂(s).

Radium som bildas från uransönderfall förväntas vara en av de största bidragarna till dos från ett KBS-3-förvar. Lösligheten av radium under djupförvarsförhållanden bestäms av radiumsulfat, men om man tar hänsyn till samfällning av radium med det barium som finns i bränslet som Ra-Ba-sulfat, minskar Ra-lösligheten. En litteraturstudie av termodynamik och kinetik för samfällning av Ra-Ba-sulfat med tillämpning på ett KBS-3-förvar har utförts /22-74/. Data från termodynamik och kinetik visar att ett samtidigt utsläpp av Ra och Ba i sulfatrika vatten orsakar medfällning av radium med barium som Ra-Ba-sulfat. Det krävs dock ytterligare kinetiska studier av hur snabbt radiogen Ra upptas av redan utfälld barit (BaSO₄(s)). En experimentell studie av kinetik för omkristallisering av barit visade att processen är snabb. Studien av kinetik för upptag av Ra från lösningar i två olika baritkristaller visade att hastigheten för upptag minskar betydligt under 400 dagar /22-75/.

Program

Studier av redoxkinetik för olika oxiderade former av radionuklider (bland annat Tc(VII), Np(V) och Pu(V), Pu(VI)) på färsk och korroderad järnytor kommer att fortsätta i samarbete med Studsvik, Nagra, ITU och PSI.

Studier av samfällning Ra-Ba sulfat ska fortsättas även under kommande period.

SKB fortsätter att delta aktivt i OECD-NEA-projektet TDB (Thermochemical Data Base Project) där kvalitetsfrågor angående användning av termodynamiska databaser i säkerhetsanalyser diskuteras regelbundet.

22.2.8 Heliumproduktion

Heliumkärnor från alfasönderfall i bränslet bildar gasformigt helium som ansamlas i gasbubblor. Om trycket i dessa bubblor blir tillräckligt stort, kan det orsaka strukturförändringar i bränslet. Dessa strukturförändringar kan teoretiskt öka fraktionen relativt löslösta radionuklider, som snabbt kommer ut i lösning vid vattenkontakt.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Ett möjligt behov av vidare forskningsinsatser konstaterades i Fud-program 2007. Eftersom heliumuppbbyggnaden sker under långa tidsperioder studeras denna process med hjälp av beräkningar och datorsimuleringar.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Inom ramen för det franska PRECCI-projektet (Research program on the long term evolution of spent fuel waste packages, CEA) har konsekvenserna för heliumuppbbyggnaden för korngränsernas mekaniska stabilitet studerats och diskuterats /22-76/. Fortsatt arbete inom detta område har resulterat i slutsatsen att heliumuppbbyggnaden inte orsakar ökad sprickbildning i bränslet. Därmed kommer inte heliumuppbbyggnad att bidra till en ökning av de snabbt lösta radionukliderna /22-4/.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

23 Kapsel

23.1 Initialtillstånd

Kapselns initialtillstånd beskriver de egenskaper som kapslarna förväntas ha när de placerats i deponeringshålen och inte kommer att hanteras mer i slutförvarsanläggningen. De krav och konstruktionsförutsättningar som relaterar till kapselns barriärfunktion i slutförvaret beskrivs i avsnitt 11.1 samt i /23-1/.

23.1.1 Variabler

I analysen av den långsiktiga säkerheten används ett antal variabler vars värden varierar med tiden som respons på de långsiktiga förändringarna hos kapselns hölje och insats. De initiala värdena hos dessa variabler kan antingen hämtas från information om egenskaper hos tillverkade och inspekterade kapslar eller annan dokumenterad information, se tabell 23-1.

De värden på variablerna som definierar initialtillståndet för kapseln kan utrönas från referensutformningen, och relaterar bland annat till tjockleken på kopparhöljet (variabel geometri) samt syrehalten i densamma (variabel materialsammansättning). Den initiala strålningen på kapselytan (variabel strålintensitet) beskriver också en del av initialtillståndet. Alla initiala värden på variablerna beskriver kapselns egenskaper och är nära sammankopplade med konstruktionsförutsättningarna (avsnitt 11.1). Dessa är definierade så att kapseln ska motstå de laster (till exempel svälltryck från buffert) som förekommer initialt samt kan tänkas uppstå i förvaret.

Kapseln ska förhindra kriticitet vilket medför att insatsens utformning ska vara sådan att kriticitet inte kan uppstå även om vatten trängt in i kapseln. Detta relaterar till variabeln geometri samt även materialsammansättning eftersom vissa grundämnen som förekommer i segjärn reflekterar neutroner bättre än järn. Temperaturen på kapselmaterialet påverkar kapselns mekaniska egenskaper och därmed definieras också en maximal temperatur i kapselns initialtillstånd.

Fortsatt utvecklingsarbete med kapselutformning beskrivs i kapitel 11. De forskningsinsatser som planeras inom området analys av initialtillståndet är fortsatt utveckling av FEM-modeller (Finite Element Method) för analys av mekaniska belastningar (se vidare avsnitt 11.3). De forskningsinsatser som berör de processer som påverkar de långsiktiga förändringarna hos kapseln, till exempel deformation och korrosion, se i avsnitt 24.2.

Tabell 23-1. Variabler för kopparhölje och segjärnsinsats och relaterade egenskaper (designparametrar) samt källa där information om variabeln ges.

Variabel	Definition	Kommentar
Geometri	Geometriska mått för kapselkomponenterna. Här ingår även beskrivning av eventuella defekter från tillverkning, svetsning och dylikt.	Referenskapseln och initialtillstånd, kapitel 11.
Strålintensitet	Intensiteten av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålningen som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Beräkning av strålningsintensitet, avsnitt 11.1.1 och 11.1.3.
Temperatur	Temperaturen som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Beräkning samt framtida inspektioner av temperatur på kapselytan, avsnitt 11.1.4.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Restspänningar från tillverkningen av kapslarna har underordnad betydelse i jämförelse med de mekaniska spänningar som uppstår i komponenterna i slutförvaret.
Material-sammansättning	Materialsammansättningen hos kapselkomponenterna, inklusive eventuella korrosionsprodukter.	Referenskapseln och initialtillstånd, kapitel 11.

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. Koppars krypegenskaper är en viktig egenskap, framför allt initialt då kopparn kryper och gapet mellan kopparhölje och insats minskar. Kapseln kan också deformeras på grund av inre korrosionsprodukter om vatten kommer in i kapseln vid ett genomgående hål i kopparhöljet.

De kemiska processerna omfattar i första hand olika typer av korrosion. Utvändig kopparkorrosion är en avgörande faktor för kopparhöljets integritet. Spänningskorrosion är en möjlig process både i kopparhöljet och i gjutjärnsinsatsen. Korrosion av gjutjärn har främst en betydelse om vatten kommer in i kapseln vid ett genomgående hål i kopparhöljet. Materialen kan också förändras av strålpåverkan.

Transport av radionuklider i närområdet kan ske via advektion och diffusion i vattenfasen eller i gasfas. Transporten kan också påverkas av sorption och löslighetsbegränsningar.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i kapseln. Indelningen i processer följer processbeskrivningen i säkerhetsanalysen SR-Site.

En del av de kapselprocesser som ingår i säkerhetsanalysen SR-Site, bedöms inte kräva något forskningsprogram. Dessa processer framgår av tabell 23-2.

23.2.2 Deformation gjutjärnsinsats

I kapitel 11 beskrivs hur kapselns referensdesign tagits fram och utvärderats för olika laster, utifrån de krav som ställs på kapseln. Underlaget för detta finns bland annat i designanalysen för kapseln. Kapselns referensdesign är nära sammankopplad med kapselns initialtillstånd, se avsnitt 23.1.

I detta avsnitt tas enbart kryp i gjutjärn och vätes inverkan på materialegenskaper i gjutjärn upp.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

För kryp i gjutjärn presenterades inget forskningsprogram i Fud-program 2007.

I programmet ingick undersökning av effekterna på kapselkomponenternas materialegenskaper av vätgasuppbyggnad från gjutjärn som korroderar på grund av kvarvarande vatten.

Kärnavfallsrådet påpekar att krypegenskaper hos segjärn behöver förklaras, liksom tidsberoende fenomen, såsom till exempel vätets påverkan på segjärn.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Gjutjärn från provtillverkningen av insatser har krypprovats vid rumstemperatur, 100 °C och 125 °C. Resultaten från den genomförda provningen demonstrerar att segjärnet uppvisar logaritmisk krypning på samma sätt som olegerat stål vid dessa temperaturer. Trots att spänningen på provstavarna

Tabell 23-2. Kapselprocesser som inte bedöms kräva något forskningsprogram. Processerna är inte kommenterade i granskningen av Fud 2007.

Stråldämpning/värmealstring
Värmetransport
Termisk expansion
Galvanisk korrosion
Spänningskorrosion gjutjärnsinsats
Jordströmmar – läckströmskorrosion

har varit av samma storleksordning som sträckgränsen är den största krypdeformationen som uppmätts endast 0,025 procent efter 10 000 timmar (drygt ett år). Logaritmisk krypning innebär att kryptöjningen mellan 100 och 1 000 timmar är lika stor som mellan 1 000 och 10 000 timmar och för varje följande ökning av tidsintervallet med en faktor 10. Även med säkerhetsanalysens tidskala på en miljon år, har krypning i gjutjärn försumbar inverkan på kapselns egenskaper. Rapportering av dessa resultat sker inom ramen för SR-Site.

Metoder för att väteladda gjutjärn från provtillverkade insatser har tagits fram, varvid elektrokemisk laddning är mer lämplig än termisk laddning. Preliminära resultat från både drag- och krypprovning visar på lägre hållfasthet och duktilitet med ökad vätehalt. Dessa resultat är dock erhållna vid kortvariga prover. Vätehalten sjunker snabbt i de väteladdade proverna, vilket försvårar långtidsprovning.

Program

Arbetet med kryp i gjutjärn kommer att fortsätta med kompletterande provning för att få ett mer enhetligt underlag.

Studierna av väteladdat gjutjärn och dess materialegenskaper kommer att fortsätta, i första hand med analyser av vilka halter som kan byggas upp i järnet, och särskilt sätta dessa i relation till den mängd vätgas som över huvud taget kan bildas genom korrosion av eventuellt kvarvarande vatten i kapseln.

23.2.3 Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck

I detta avsnitt redovisas forskningen om koppars krypegenskaper. Deformationen av kopparn från yttre övertryck vid olika laster behandlas integrerat med gjutjärnsinsatsen, se avsnitt 23.2.2.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Programmet för krypprovning skulle fortsätta under treårsperioden, med fokus på FSW (Friction Stir Welding)-svetsens egenskaper, effekter av extremt långsam pålastning och krypning med fleraxligt spänningstillstånd. Studier av hur krypegenskaperna påverkas av deformationshårdnande vid den kallbearbetning som kan uppstå vid till exempel hantering ingick också i programmet.

I granskningen av Fud-program 2007 såg SKI positivt på de analyser av kopparhöljet som genomförts med hänsyn till krypning, men uppmanade SKB att utföra ytterligare studier med andra krypmodeller. Dessutom påpekades att samverkans effekter mellan plastisk deformation och krypdeformation bör beaktas vid analys av kopparhöljets integritet.

Kärnavfallsrådet efterfrågade en validerad krypmodell för att olika tidsberoende förlopp ska kunna beaktas, såsom eventuell skjuvning av kapseln. Också inverkan av fosfor på kryphållfastheten hos rent koppar, fosfors långtidsstabilitet och roll måste utredas vidare. Kallbearbetningseffekter måste analyseras med avseende på krypegenskaper.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Under perioden har såväl krypprovning som modellutveckling fortsatt /23-2, 23-3/. När det gäller modellering har framför allt slutsatserna från 2007 om fosfors inverkan /23-4, 23-5/ inkluderats i nya modeller /23-6, 23-7/.

Till att börja med var enbart sekundärt kryp inkluderat /23-8/, men senare har också primärt kryp kunnat tas med genom en empirisk modell /23-9, 23-10/.

Genom långsam dragprovning har spännings-töjningskurvor uppmätts för fosfordopad syrefri koppar vid temperaturer mellan 20 och 175 °C. Från dessa har en fundamental krypmodell utan passningsparametrar tagits fram /23-11/. Modellen baseras på ett uttryck för hastighet hos sekundärkryp. En direkt relation mellan kryp- och dragprovningen med konstant töjning har kunnat slås fast.

Utvecklingen av modellerna, liksom en översikt över den krypprovning som gjorts vid KIMAB (tidigare Institutet för Metallforskning) och KTH under perioden 1984–2009 har sammanställts /23-12/. Rapporten innehåller också en analys av hur osäkerheter i parametrarna i kryppmodellerna /23-6, 23-7/ inverkar på primär och sekundär kryphastighet. Båda dessa modeller har använts i modelleringen av krypdeformation i kopparkapseln efter deponering (i designanalysen av kapseln), se avsnitt 11.3 och 23.2.1.

Studier av kallbearbetning av koppar och dess inverkan på krypegenskaperna pågår, med de första preliminära resultaten för fyra typer av kallbearbetning, såväl i kompression som i drag /23-13/. De effekter som kunnat konstateras är att krypduktiliteten minskar (både för kompression och drag), liksom att kryplivslängden ökar och kryphastigheten minskar för kallbearbetning i form av drag. Inverkan vid kallbearbetning i kompression beror på kompressionsriktning. Areareduktionen påverkas inte i något fall.

Betydelsen av fleraxliga spänningstillstånd har studerats både experimentellt och med modellering /23-14, 23-15/ varvid kunde konstateras att den fosfordopade syrefria kopparn inte är känslig för anvisningar. Kryplivslängden kan uppskattas genom FEM-modellering av den stationära krypspänningen.

Program

SKB kommer att fortsätta programmet att undersöka koppars krypegenskaper, och med flera inriktningar parallellt. Långsam dragprovning kommer att utföras på FSW-material, med syfte att ta fram fundamentala ekvationer även för detta material. Den framtagna motsvarande modellen för grundmaterial kommer att vidareutvecklas för att kunna användas i FEM-modellering av kapseln under belastning.

Inverkan av kallbearbetning kommer att studeras vidare, liksom fleraxliga spänningstillstånd.

Ett ytterligare område där arbete pågår är inverkan av väte på koppars krypegenskaper. Som ett första led undersöks hur man kan väteladda koppar på ett kontrollerat sätt, företrädesvis genom katodisk laddning. Även ab initio-beräkningar (kvantmekanisk modellering, ”från början”) av löslighet och diffusion av väte i koppar kommer att genomföras.

23.2.4 Deformation från inre korrosionsprodukter

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Slutsatsen i Fud-program 2007 var att expansion orsakad av anaerob korrosion i spalter inte förekommer, vilket stöds av både experimentella studier och arkeologiska analogier. Hur korrosionen kan fortgå när bildade korrosionsprodukter gradvis kompakteras i spalten studeras i miniatyrkapslar som installerats i Äspölaboratoriet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Experimentet med miniatyrkapslar i Äspölaboratoriet (Minican) /23-16/ drivs vidare. Kapslarna har en diameter på 145 millimeter och en längd på 315 millimeter, och har en design som väsentligen speglar den fullstora designen. Höljet består av koppar av samma kvalitet som i specifikationen för de fullstora kapslarna, med en godstjocklek på 7,5 millimeter. En insats av segjärn är placerad inuti. Hela kapseln är sedan placerad i en bentonitbur (två perforerade cylindrar av rostfritt stål med bentonit emellan). Kapseln och bentonitburen är galvaniskt isolerade. Kapslarna i sina bentonitburar är sedan placerade i varsitt borrhål (diameter 300 millimeter) på cirka 450 meters djup i Äspölaboratoriet. Syftet med experimentet är primärt att studera hur vatten kan ta sig in till insatsen och hur eventuella korrosionsprodukter utvecklas vid ett hål i kopparhöljet. Miniatyrkapslarna har därför borrhål i kopparhöljet (en millimeter i diameter, 1–2 hål per kapsel). Kapslarna och borrhålen är också utrustade med ett flertal givare för att mäta framför allt elektrokemiska potentialer, vilka används för beräkning av korrosionshastigheter, liksom anordningar för att ta vattenprover.

Resultaten hittills visar på ökad halt av järn och minskat pH inne i bentoniten, vilket kan bero på mikrobiell aktivitet som påverkar korrosionen av järn- och ståldelar i experimentet. De uppmätta potentialerna sjunker i takt med att syre förbrukas, vilket konfirmeras av analyser av löst gas.

Program

Mätningarna på miniatyrkapslarna i Äspölaboratoriet kommer att fortsätta. Planering har påbörjats för att ta upp åtminstone en av kapslarna, för att framför allt kunna jämföra de elektrokemiskt uppmätta korrosionshastigheterna med korrosion uppmätt genom vägning av elektroderna.

23.2.5 Strålpåverkan

Gamma- och neutronstrålning kan inverka på materialegenskaperna hos koppar och gjutjärn.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 noterade SKB att konsekvenserna av strålningspåverkan på insatsen måste utredas ytterligare, efter att beräkningar som gjorts av CEA visat att strålningsinducerade urskiljningar av koppar i låglegerat stål kan ge upphov till försprödning /23-17, 23-18/. För koppar har tidigare beräkningar visat att strålningens inverkan är försumbar /23-19/.

Kärnavfallsrådet påpekar att tidsberoende fenomen, såsom till exempel försprödning hos segjärnsinsatsen måste förklaras.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

En studie /23-20/ har genomförts, och beräkningarna som är underlag för slutsatserna i CEA-studierna har kunnat verifieras. En genomgång av modellerna som kopplar utfällningen av kopparpartiklar till ändringen i mekaniska egenskaper har däremot visat på brister i den konceptuella förståelsen. Detta ändrar dock inte på de slutsatser som kan dras från empiriska data. I studien har också en första analys gjorts av risken för strålningsaccelererad diffusion av fosfor till korngränser, vilket inte kan uteslutas. Segregering av fosfor till korngränser kan ge korngränsförsprödning i ferritiska stål /23-21/.

I specifikationen för insatsen har kravet införts på maximalt 0,05 procent koppar i gjutjärnet.

Program

De teoretiska studierna kommer att fortsätta under perioden, framför allt med beräkningar av löslighet och diffusivitet av koppar i järn, samt studier av mekanismerna för utfällning av koppar vid låga temperaturer, särskilt i samverkan mellan kopparkluster och vakanser. Experiment med bestrålning av gjutjärn planeras för att validera de använda modellerna.

23.2.6 Korrosion gjutjärnsinsats

Om vatten är i kontakt med gjutjärnsinsatsen kan anaerob korrosion ske. Vatten kan finnas kvar inuti insatsen (i mycket begränsad mängd, eftersom bränslet torkas före inplacering i kapseln) eller nå in till insatsen vid en genomgående skada i kopparhöljet. Luft kan också finnas kvar i kapseln, dock i mycket begränsad mängd (se avsnitt 11.1.3).

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKB har studerat interaktioner mellan bentonit och korroderande järn inom EU-projektet NF-Pro. En av slutsatserna var att närvaro av bentonit ökade korrosionshastigheten något, men minskade volymen på korrosionsprodukterna, jämfört med järnkorrosion utan bentonit. Ramanspektroskopi visade att korrosionsprodukterna bestod av en inhomogen blandning av magnetit, hematit och götit, där magnetit var dominerande. De experimentella studierna av växelverkan mellan bentonit och järn skulle fortsätta under perioden, och kompletteras med geokemisk modellering.

Gammastrålning kan öka korrosionshastigheten, men för en intakt kapsel begränsas den totala korrosionen ändå av mängden vatten. Resultaten som presenterades i Fud-program 2007 har nu också publicerats i en vetenskaplig artikel /23-22/.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

De fortsatta studierna av prover från NF-Pro har i första hand undersökt hur bentoniten påverkas av korroderat järn, och har fortsatt bekräftat de tidigare resultaten att katjonkapaciteten reduceras och bentonitens svällkapacitet minskar /23-23, 23-24/. Inga enskilda järnoxid- eller järnhydroxidfaser kunde påvisas i de detaljerade petrografiska studierna, utan järnet hade gått in i lerpartiklarna, se även avsnitt 24.2.17. Den geokemiska modelleringen studerade transporten av järn i bentoniten och utgick från den uppmätta gasproduktionen som ett mått på korrosionen av järnet /23-25/. Jonbytes- och sorptionsprocesser var inte tillräckliga för att förklara halten järn i bentoniten, utan bildning av fasta faser eller mineralomvandlingar föreslogs som bidragande förklaringar.

Program

Området korrosion av gjutjärnsinsatsen bedöms inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

23.2.7 Korrosion kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 konstaterades att arbeten inom korrosion av koppar skulle fortsätta inom flera delområden.

Mekanismerna och kinetiken för kopparkorrosion i anaeroba klorid- och sulfidlösningar studerades elektrokemiskt för att utveckla en korrosionsmodell. Målet var att kunna använda den i säkerhetsanalysen SR-Site. Som ett underlag till detta studerades särskilt omvandlingen av en oxidfilm i en sulfidlösning. Egenskaperna hos rena kopparytor och kopparytor med med olika ytfilmer studeras avseende sorberade och kemiskt bundna karbonat- och kloridspecies.

Under perioden var målet också att ta fram kvantitativa data på sulfidbildning och diffusion för att kunna inkludera mikrobiell aktivitet i säkerhetsanalysen i stället för att som tidigare, utesluta mikrobiell sulfidbildning på grund av miljöfaktorer.

En uppdatering av SKB:s och Posivas gemensamma sammanställning om kopparkorrosion pågick i Posivas regi.

I granskningen av Fud-program 2007 framförde SKI att SKB behöver ta fram uppdaterad information av relevans för frågan om kopparkorrosion i syrefritt vatten, baserat både på experiment och teoretiska beräkningar. Även kopplingen till frågan om väteförsprödning bör utredas.

SKI anser vidare att SKB behöver komplettera sitt program för korrosion med korrosionsförsök på kopparytor direktexponerade för grundvatten. Kopparkorrosionens inverkan av mikrobiella processer behöver studeras vidare, både för fall med och utan bentonit. SKI anser att fortsatta studier av uppbyggnaden av sulfidfilmer på kopparytan är angelägna.

SKB bör också överväga att utöka redovisningen för att bättre utnyttja den befintliga kunskapen kring olika former av koppar i naturen.

SSI anser att det finns kvarvarande osäkerheter i förståelsen av den mikrobiella aktiviteten i närområdet i slutförvarsmiljön och dess betydelse för kopparkorrosionsprocesser. Programmet bör ta en bredare ansats för att belysa samspelet mellan olika mikrober och de begränsningar som ges av tillgängliga energikällor och näringsämnen.

SSI anser att det är för tidigt att avfärda risken för korrosion i syrefritt vatten och dess påverkan på kapselns integritet. Eftersom processen potentiellt sett kan ha stor betydelse för förvarets funktion, bör SKB ta fram ett underlag för att kunna ta ställning till om processen behöver inkluderas i kommande säkerhetsanalyser.

Kärnavfallsrådet anser att fortsatta korrosionsstudier erfordras inom olika områden: accelererade långtidsförsök för spänningsskorrosion, allmän korrosion i klorid- och sulfidhaltiga vatten med bentonit och mikrobiell korrosion. Vidare måste mekanismer av korrosion i syrefritt vatten undersökas experimentellt för att visa om korrosion av koppar genom väteutdrivning kan ske i rent avjoniserat, syrefritt vatten och i grundvatten med bentonit.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Studien av mekanismer för sulfidering av kopparoxidfilmer har fortsatt /23-26/, och bekräftat de tidigare slutsatserna om tillväxt av kopparsulfidfilm. Filmtillväxten sker under sulfidtransportkontroll när systemet närmar sig stagnanta förhållanden. Tillväxten av kopparsulfidfilmen kan ske enligt två olika vägar. Den initialt bildade filmen tillväxer snabbt via en jontransportprocess. Om filmen förblir intakt sker fortsatt tillväxt mycket långsamt. Om spänningar i filmen gör att sprickor bildas i filmen, fortsätter filmtillväxten med att en tjock, porös film bildas. I närvaro av klorid destabiliseras kopparsulfidfilmen och fortsatt tillväxt ger likaledes en tjock, porös film.

För att belysa egenskaperna hos kopparoxidfilmer har man studerat in situ-tunna kopparfilmer i kontakt med artificiellt grundvatten och klorid-, sulfat- och vätekarbonatjoner i vattenlösning /23-27, 23-28/. Förändringar i kopparoxidfilmerna följdes med röntgenabsorptionspektroskopi (XAS) och resonant inelastisk röntgenspridning (RIXS). Som väntat ökade korrosionshastigheten för höga kloridhalter, medan vätekarbonat i lösningen ökade tendensen till passivering. I kontakt med grundvatten bildades $\text{Cu}(\text{OH})_2$ som korrosionsprodukt /23-28, 23-29/.

Frågan om korrosion av koppar i rent, syrefritt vatten har uppmärksammats under de senaste åren. Den övervägande slutsatsen i den etablerade litteraturen är att koppar inte reagerar med vatten under vätgasbildning, under de potential- och pH-förhållanden som råder i förvaret /23-30, 23-31/. Denna slutsats har ifrågasatts i /23-32, 23-33, 23-34/ som redovisar experiment där gastryck uppmätts och korrosionsprodukter analyserats med i första hand SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy). Resultaten har tolkats som korrosion av koppar under bildning av vätgas och en stabil förening, först uttryckt som CuO_xH_y , senare beskriven som en amorf koppar(I)hydroxid. Kommentarer med alternativa tolkningar har framförts till den första av de tre publikationerna /23-35/, vilket i sin tur kommenterades av författarna /23-36/. Även till den tredje artikeln har synpunkter på tolkningen framförts /23-37/ med genmäle /23-38/.

En kritisk genomgång har gjorts av Fraser King av försök som åberopas både som stöd och som argument emot den föreslagna mekanismen. Slutsatserna i rapporten är att underlaget som stöd för mekanismen delvis är ofullständigt och motsägelsefullt, och att andra forskare inte lyckats reproducera resultaten. Vidare dras slutsatsen att även om mekanismen skulle finnas, så skulle den inte ha någon allvarlig inverkan på kapselns livslängd i förvaret.

Stabiliteten hos tänkbara föreningar av koppar(I), syre och väte har studerats /23-39/ med ab initio-beräkningar (kvantkemiska beräkningar av elektronstrukturer), och därmed kan termodynamiska data beräknas som funktion av temperaturen. Slutsatserna i studien är att trots att ett flertal tänkbara strukturer för fasta faser av kopparoxyhydrid ($\text{Cu}_4\text{H}_2\text{O}$) och kopparhydroxid (CuOH) har undersökts, har ingen fas som är mer stabil än Cu_2O kunnat identifieras, vilket alltså talar emot att bildning av en stabil koppar-syre-väte-förening är drivkraft för korrosion.

Korrosion av koppar i syrefritt vatten diskuterades vid ett vetenskapligt seminarium ordnat i Kärnavfallsrådets regi i november 2009. Seminariet tog upp såväl den fundamentala förståelsen för processen, som frågan om tillräckligt underlag finns för att bedöma hur viktig denna process är eller skulle vara i slutförvaret för använt bränsle. I slutsatsen från seminariet sägs att nyckelfrågan är vilket partialtryck vätgas har vid jämvikt i reaktionen mellan koppar och vatten. Termodynamiska beräkningar visar på ett extremt lågt vätgastryck, vilket är grunden för den generella ståndpunkten att koppar är motståndskraftigt mot korrosion i rent, syrefritt vatten. Om det däremot förekommer en annan, ännu okänd reaktionsprodukt, måste denna först identifieras och karaktäriseras, innan den kan inkluderas i de termodynamiska beräkningarna. Därefter kan effekten av den bedömas. Vidare måste korrosionshastigheten för reaktionen bestämmas, och korrosion i realistisk slutförvarsmiljö behöver studeras. Medlemmarna i expertpanelen menade också att fortsatt forskning är nödvändig för att klargöra de experimentella resultaten och de analytiska metoderna som Szakalos och Hultquist använt /23-40/.

Kopparprover med FSW-svetsat material har studerats elektrokemiskt /23-41/ för att undersöka om en potentialskillnad mellan svetsat material och grundmaterial skulle kunna ge galvanisk korrosion, vilket noterats i den tidigare studien om korngränskorrosion /23-42/. I studien undersöktes också om metallpartiklar från svetsverktyget skulle kunna ge upphov till och underhålla korrosion. Resultaten som genomfördes i kloridmiljö, visar på mycket små galvaniska strömmar mellan svetsat material och grundmaterial, och av växlande riktning. Yteffekter på den obehandlade svetsytan är troligen orsaken till potentialskillnaderna, men dessa skillnader i ytskiktets egenskaper avtar med tiden i och med att oxidskiktet byggs upp. Svetsverktyget är katodiskt jämfört med svetsmaterialet, och små fragment av verktygsmaterial skulle ha en mycket liten katodisk yta jämfört med svetsmaterialet. Potentialer även under aeroba förhållanden undersöktes, men ingen risk för omvänd polarisation fanns (kopparns potential ökade, medan svetsverktygets potential i stort sett var oförändrad).

Vid transport och hantering av kapseln, kan materialet utsättas för kallbearbetning i form av slag eller stötar. Lokalt skulle därför små ytor av koppar kunna ha andra korrosionsegenskaper. I studierna av svetsat material /23-41, 23-42/ uppmättes potentialminskningar på 90–200 mV, men som inte gav upphov till galvanisk korrosion. Potentialminskningar på 7–12 mV har uppmätts på koppar utsatt för plastisk töjning /23-43/. Det är därför mycket osannolikt att små kallbearbetade områden på kapselytan skulle orsaka galvanisk korrosion.

Uppdateringen av SKB:s och Posivas gemensamma sammanställning om kopparkorrosion är i det närmaste slutförd.

För att ta fram kvantitativa data på sulfidbildning och diffusion har flera studier genomförts. Förekomsten och överlevnaden hos sulfatreducerande bakterier i kommersiell MX-80-bentonit undersöktes /23-44/ och studien visade att *D. africanus* kan överleva i en vilande, uttorkad form i torr bentonit. När vatten sätts till aktiveras bakterierna, och kan producera sulfid, åtminstone upp till en temperatur på 40 °C och en salthalt på fyra procent. Bakterierna kunde aktiveras även efter en värmebehandling av den torra bentoniten vid 100 °C i 20 timmar.

I fortsatta studier undersöktes produktionen av kopparsulfid och därigenom korrosionen av koppar i kompakterad bentonit med olika densitet (1,5–2,0 g/cm³) och olika förbehandlingar med värme /23-45, 23-46/. Kopparbleck placerades i kompakterad bentonit, som kontaktades med grundvatten från 450 meters djup i Äspölaboratoriet. Radioaktivt märkt sulfat (S-35) tillsattes tillsammans med olika typer av energikällor för bakterierna. Bildad kopparsulfid på kopparblecken undersöktes med autoradiografi, varvid fördelningen av det radioaktiva svavlet kunde studeras. Med hjälp av en diffusionsmodell beräknades diffusionskoefficienter för sulfiden i bentoniten, vilka överensstämde med data ur litteraturen.

Resultaten från dessa studier bekräftar tidigare resultat, att sulfidproduktionen minskar med ökad densitet och korresponderande ökning av svälltrycket /23-47, 23-48, 23-49/. Flera faktorer har diskuterats som orsak till att bakterier har svårt att vara aktiva i kompakterad bentonit: högt svälltryck, låg vattenaktivitet samt för liten porositet för bakterier. Oavsett den exakta kombinationen av begränsande faktorer, visar flera oberoende studier på att den sulfidproduktion som kan ske i kompakterad bentonit är mycket begränsad. Analysen av det bildade kopparsulfidskiktet, tillsammans med diffusionsberäkningarna som presenteras i det senast utförda arbetet /23-46/ visar att den bildade kopparsulfiden hade sitt ursprung i sulfid bildad utanför bentoniten.

I Lot-experimentet på Äspölaboratoriet har kopparkorrosion studerats som en mindre del av projektet. I analyser av försökspaketet A2 konstaterades att korrosionsprodukterna som bildats på kopparbleck huvudsakligen bestod av kuprit (Cu₂O) och paratakamit (Cu₂(OH)₃Cl) /23-50/. Den genomsnittliga korrosionshastigheten uppmättes till mindre än 0,5 µm/år, vilket överensstämmer med den modellering som gjorts tidigare /23-51/ och som konservativt uppskattade korrosionshastigheten under oxiderande förhållanden i bentoniten till sju µm/år.

Realtidsmätning av korrosionshastigheter har studerats med harmonisk analys, polarisationsmotstånd och brusmotståndsmätning på elektroder i Lot-försökets A2-paket, men de olika metoderna ger inte entydiga resultat /23-52/. Kopparelektroder som suttit monterade in situ har flyttats över till laboratorium för fortsatta studier /23-53/. Elektrokemisk impedansspektroskopi har använts för att vidare utvärdera korrosionsmätningarna, men analyser av själva elektroden är nödvändiga för att kunna dra slutsatser om de olika elektrokemiska mätmetodernas användbarhet /23-53/.

Program

SKB:s studier av korrosion på koppar fortsätter, för att ge ytterligare kunskaper om detaljerna i korrosionsmekanismerna.

Mekanismer för de reaktioner som kan ske på kopparytor och på kopparoxid studeras vidare, dels genom elektrokemiska mätningar på koppar i syrefri miljö, dels genom kvantkemiska beräkningar. Egenskaperna hos koppar(I)oxid studeras vidare med ab initio-beräkningar på bulkfaser. Jämviktsreaktioner för systemet koppar och vatten studeras också. Experimentella studier har startats, eller ska starta, för att mäta gasutveckling från koppar. Delvis kommer försöken att vara upprepning av försöken i tidigare publicerade studier.

Studien av kopparsulfidfilmers egenskaper fortsätter, med särskilt fokus på hastighetsbestämmande steg i tillväxten av kopparsulfidfilmer.

Studierna av mikroorganismers aktivitet i kompakterad bentonit har visat att aktivitet kan förekomma, men att den är mycket begränsad. Gränzytan mellan kapsel och buffert skulle eventuellt kunna vara en mer gynnsam miljö för mikroorganismer än den kompakterade bentoniten, varför en studie av möjligheten till bildningen av en biofilm av sulfidbildande bakterier på koppar i kompakterad bentonit har startats. I studien placeras kopparkutsar i kompakterad bentonit med olika densitet, vilka sedan kontaktas med grundvatten på 450 meters djup i Äspölaboratoriet tillsammans med olika typer av energikällor för bakterierna. Koppar är en tungmetall och har i höga halter en negativ effekt på livsprocesser, samtidigt som koppar är en essentiell metall som många mikroorganismer behöver spårmängder av. Därför studeras även titankutsar som jämförelse.

För att verifiera korrosionsegenskaperna hos koppar med kallbearbetade områden planeras mätningar liknande de för svetsat material.

Analyserna av och med elektroderna från Lot-försöket kommer att fortsätta. Delar av försöket bryts och elektroderna analyseras med olika ytanalyser, medan andra elektroder bevaras i bentoniten och används för fortsatta mätningar, tillsammans med ytterligare nya elektroder.

23.2.8 Spänningskorrosion kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs studier av spänningskorrosion i acetathaltiga vatten, liksom en studie av spricktillväxt, med slutsatsen att förutsättningarna för sprickbildning på grund av spänningskorrosion skulle utredas ytterligare.

I granskningen ansåg SKI att spänningskorrosion inte kan avfärdas som en dimensionerande process i förvaret. SKB bör visa att även om en spricka initieras, är tillväxten så långsam att kapselns integritet inte äventyras eller redovisa konsekvensen av sprickor orsakade av spänningskorrosion.

SSI gjorde bedömningen att studierna av enskilda bakterier knapphändigt kan belysa den fullständiga rollen av de olika mikrobiella processerna i kapselkorrosionen. Exempelvis kan de processer som berör kvävecirkulationen vid ökade koncentrationer av ammoniak och nitrit ha en negativ inverkan på spänningskorrosion av kopparkapslarna.

Kärnavfallsrådet slutsatser var att fortsatta korrosionsstudier behövs inom området accelererade långtidsförsök för spänningskorrosion.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

En kritisk genomgång av föreslagna mekanismer för spänningskorrosion på koppar är i det närmaste slutförd. I studien beskrivs det rådande kunskapsläget för spänningskorrosion i koppar och kopparlegeringar, och en bedömning görs av risken för spänningskorrosion på kapseln i förvarsmiljö. Ett flertal olika föreslagna mekanismer har gått igenom i detalj. Slutsatserna i studien är att sannolikheten för spänningskorrosion under den inledande oxiderande perioden är låg på grund av avsaknaden av nödvändiga joner, och att det saknas en välgrundad mekanism för spänningskorrosion under reducerande förhållanden.

En experimentell studie med långsam dragprovning av koppar i sulfidhaltigt simulerat grundvatten har presenterats /23-54/. I studien rapporteras försämrad duktilitet på grund av intergranulär korrosion vid en sulfidhalt på 0,01 mol per liter.

Inom det kanadensiska programmet har man i experimentella studier /23-55, 23-56, 23-57, 23-58, 23-59/ undersökt spänningskorrosion i nitrit-, ammonium- och acetatmiljö. Slutsatserna från dessa experiment är:

- förutom i de mest aggressiva miljöerna, uppvisar fosfordopad syrefri koppar ett duktilt uppträdande i nitrit-, ammonium- och acetatlösningar,
- enbart provstavar med en tydlig oxidfilm uppvisade sprickbildning, och enbart vid potentialer och pH som är konsistenta med stabilitet hos en Cu_2O -film,
- kloridjoner motverkar spänningskorrosion på koppar,
- i nitritlösningar minskar mottagligheten för sprickbildning med ökande temperatur.

Beräkningar med kryppmodellen som inkluderar både primärt och sekundärt kryp /23-9, 23-10/ visar på dragspänningar på kopparytan, och även delar där dessa går genom hela koppartjockleken.

Program

Forskningsprogrammet fortsätter inom området spänningskorrosion, för att ytterligare utreda förutsättningarna för spänningskorrosion på koppar.

En experimentell studie genomförs för att undersöka under vilka förhållanden spänningskorrosion kan uppstå i sulfidhaltig miljö. Preliminära resultat visar på svårigheter att få sprickbildning i den utsträckning Taniguchi och Kawasaki /23-54/ erhöll.

I ett samarbetsprojekt med Posiva studeras kopparmaterialets uppförande i simulerat grundvatten med ammonium. Studierna utförs som långsam dragprovning under potentialkontroll (simulering av oxiderande miljö i förvaret) vid olika ammoniumhalter. Även elektrokemiska mätningar (impedans) kommer att genomföras.

23.2.9 Utfällning av salt på kapselytan

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Processen var inte specifikt beskriven som en kapselprocess i Fud-program 2007.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Utfällning av salter på kopparytor har studerats i bland annat Lot A2-försöket /23-50/. Saltutfällning skulle kunna öka halten klorid lokalt och därmed korrosionen på kopparn, men denna effekt är märkbar enbart vid lågt pH, vilket inte är fallet i närvaro av bentonit. Eventuella utfällningar av kalciumsulfat och -karbonat är inte elektriskt ledande, varför risken för lokal korrosion inte ökar på grund av sådana utfällningar /23-60/.

Program

Inget forskningsprogram för kapseln planeras för området.

23.2.10 Radionuklidtransport

Transport av radionuklider i kapselns hålrum och genom en genombruten kapselvägg behandlas (ofta pessimistiskt förenklat) integrerat med andra processer. Radionuklidtransport i närområdet behandlas i avsnitt 24.3.

24 Buffert och återfyllning

I detta kapitel behandlas forskning kring de lerbarriärer SKB har utvecklat för slutförvaren. Återfyllningen i tunnarna är numera definierad som en barriär i KBS-3-konceptet /24-1/. Kapitlet behandlar även lerbufferten i silon i SFR 1. De krav som sätts på bufferten beskrivs i detalj i del III. I detta kapitel hanteras de egenskaper hos lerbarriärerna som påverkar den långsiktiga säkerheten.

24.1 Initialtillstånd

Initialtillståndet beskriver de tekniska barriärernas egenskaper då de slutligt satts på plats i slutförvaret. Det är startpunkten för säkerhetsanalysen och beskrivs av de initiala värdena hos ett antal variabler, se tabell 24-1. Initialtillståndet för vissa av de variabler som är relevanta för buffert och återfyllning är resultatet av vald referensutförande, tillverkning och installation som har tagits fram utifrån ställda konstruktionsförutsättningar, se kapitel 12. Det förväntade initialtillståndet hos andra variabler beror på hur buffert och återfyllning utvecklas efter installation och bestäms genom analyser. Forskningen är fokuserad främst på buffertens variabler, men resultaten kan oftast appliceras även på återfyllningen.

När det gäller SFR är den största delen av bentonitbufferten i silon redan installerad. I praktiken betyder detta att initialtillståndet redan är känt. Informationen behövs för att kunna beskriva den långsiktiga utvecklingen i förvaret.

Buffertens barriärfunktion i Kärnbränsleförvaret

Buffertens huvuduppgift i Kärnbränsleförvaret är att hindra strömmande vatten från berget att komma i kontakt med kapseln och det använda bränslet och därmed försäkra att eventuell transport av korroderande och radionuklider dominerar av diffusion. För att klara denna uppgift måste den hydrauliska konduktiviteten vara låg, dimensionerna på bufferten måste bibehållas, bufferten måste kunna självläka samt vara fysikaliskt och kemiskt stabil i ett långt tidsperspektiv.

Andra viktiga egenskaper hos bufferten relaterar till möjlig påverkan på kapseln i Kärnbränsleförvaret. Dessa egenskaper är gasgenomsläpplighet, svälltryck, deformerbarhet, värmeledningsförmåga, kolloidfiltrering samt mikrobiell aktivitet. De krav som gäller ur perspektivet långsiktig säkerhet finns sammanställda som konstruktionsförutsättningar i avsnitt 12.1 och 13.1 samt i /24-1/.

De variabler som beskrivs nedan är nära sammankopplade med barriärfunktionerna och de funktionsindikatorer som används för att utvärdera buffertens funktion i säkerhetsanalysen. Värdena hos variablerna förändras genom processer som sker i buffert och återfyllning efter förslutning, se avsnitt 24.2.

För att uppnå önskad barriärfunktion måste buffertens vattenmättade densitet, hydrauliska konduktivitet, svälltryck och temperatur säkerställas inom vissa gränsvärden, se vidare avsnitt 12.1 och /24-1/. Forskningen om buffert och återfyllning utgår därför från de egenskaper och processer som påverkar dessa variabler.

Tillverkning och installation av buffert beskrivs i kapitel 12. I det följande tas tillverkningsfrågor upp endast i den mån de har betydelse för redovisningen av forskningsprogrammet för den långsiktiga funktionen.

Återfyllning i Kärnbränsleförvaret

Återfyllningen är nödvändig för att bufferten och berget ska få önskad funktion. De krav som ställs på återfyllningen beskrivs i kapitel 13. De viktigaste funktionerna hos återfyllningen är att göra masstransportförmågan jämförbar med det omgivande berget samt att minimera buffertens expansion uppåt. Viktiga egenskaper hos återfyllningen är därmed hydraulisk konduktivitet och svälltryck.

Återfyllningen får inte ha någon negativ påverkan på barriärerna i förvaret, vilket ställer en del krav på den kemiska sammansättningen.

Bentonitbarriärer i SFR

Användning av lerbarriärer i SFR har mer gemensamt med bufferten i Kärnbränsleförvaret än med de övriga barriärerna i SFR. Forskningsprogrammet för bentoniten i SFR presenteras därför tillsammans med bufferten i detta avsnitt. Silon i SFR 1 är omgiven av en bentonitbuffert som är placerad mellan betongkonstruktionen och bergväggen. Produktnamnet är GEKO/QI och det är ett sodaaktiverat material. De funktioner och egenskaper som är viktiga för silobufferten /24-2/ är snarlika de för bufferten i Kärnbränsleförvaret.

24.1.1 Variabler

De variabler som har definierats för buffert och återfyllning finns presenterade i tabell 24-1. Dessa variabler kommer att påverkas av de processer i förvaret som tar vid efter förslutning. För Silon pågår arbete med att ta fram en liknande uppsättning variabler.

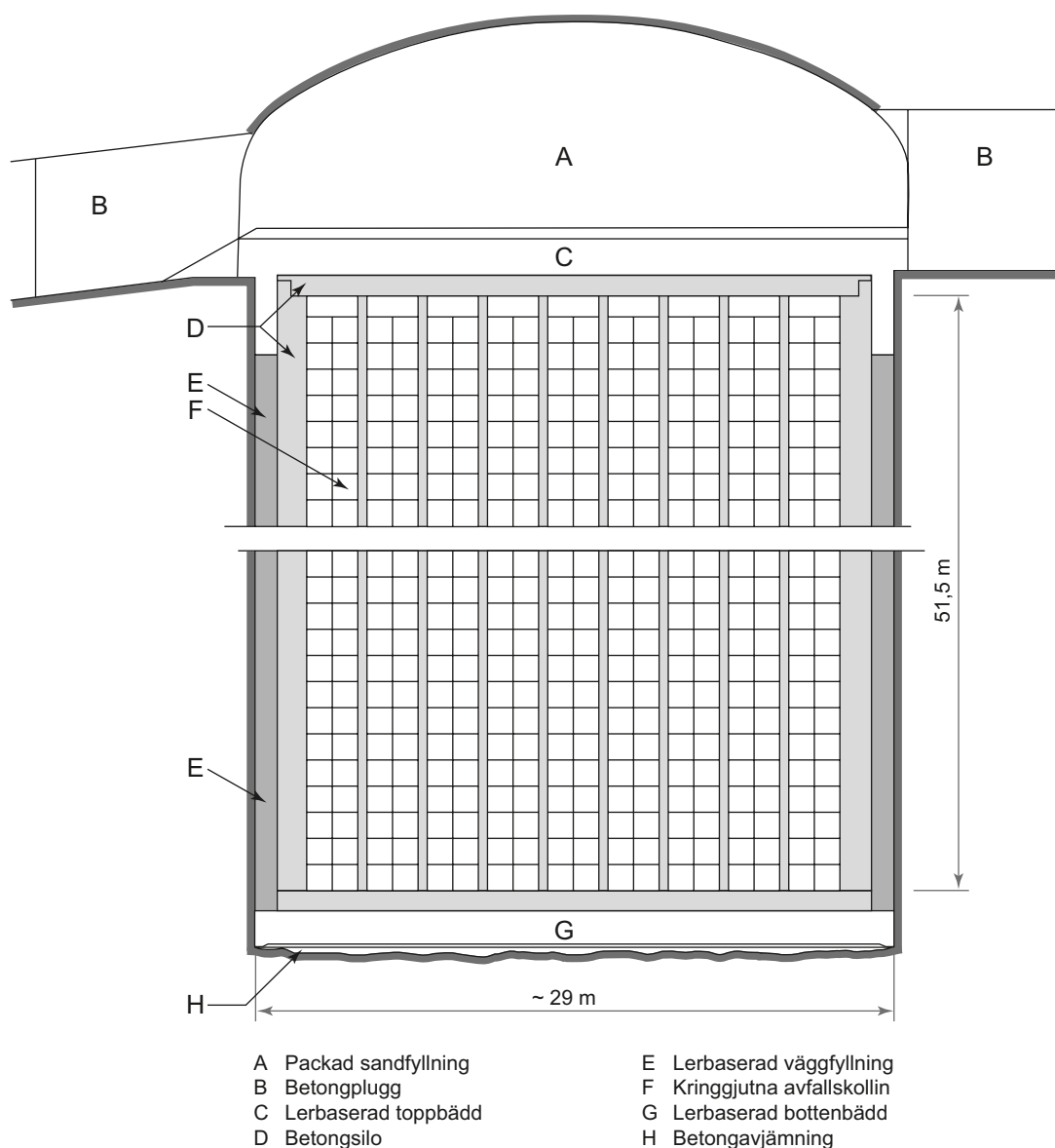
24.1.2 Geometri

Buffertens geometri bestäms av dimensionerna på kapseln och den tjocklek på buffertmaterialet som krävs för att få önskad funktion. De tidigare angivna måtten /24-3/ med 35 centimeter på kapselns sidor, 50 centimeter under kapseln och 150 centimeter ovanför kapseln gäller fortfarande för KBS-3V. Dimensionerna kan bli något annorlunda för KBS-3H.

Bufferten i SFR-silon består av en botten- respektive toppbädd samt en väggfyllning. Se figur 24-1.

Tabell 24-1. Variabler för bufferten och återfyllningen.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Geometriska mått för buffert och återfyllning. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären.	24.1.2
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. I denna variabel ligger också buffertens densitet.	24.1.3
Strålintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.4
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.5
Vattenhalt	Vattenhalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.6
Gashalter	Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.7
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.8
Lastsituation	Tryck som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.9
Bentonitsammansättning	Den kemiska sammansättningen av bentoniten (plus eventuella radionuklider) i tid och rum i bufferten. Detta inkluderar också föroreningar och andra mineral än montmorillonit.	24.1.10
Montmorillonitsammansättning	Montmorillonitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till montmorillonitytan ingår i denna variabel.	24.1.11
Porvattensammansättning	Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning.	24.1.12
Konstruktionsmaterial	Sammansättning av eventuella konstruktionsmaterial i deponeringshålen. Detta inkluderar inte längre bottenplattan av cement. Den hanteras som en egen systemdel.	24.1.13



Figur 24-1. Principsektion genom SFR-silon /24-2/.

24.1.3 Porgeometri

För att uppnå de definierade buffertfunktionerna krävs en specifik motjonskoncentration i porvattnet. För ett givet buffertmaterial styrs koncentrationen av den totala vattenvolymen, vilken bestäms av porositeten. Buffertens tätande egenskaper, som svälltryck och hydraulisk konduktivitet, är starkt beroende av porositeten.

I Design premises /24-1/ för bufferten ges som designförutsättning att bufferten i mättat tillstånd har en densitet på $2\,000 \pm 50$ kilo per kubikmeter (kg/m^3). Detta baseras på egenskaperna hos referensmaterialet (MX-80) som har en korndensitet på $2\,750 \text{ kg}/\text{m}^3$ och förutsätter att vattendensiteten är $1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$. Buffertens torrdensitet är därmed $1\,570 \pm 30 \text{ kg}/\text{m}^3$ vilket motsvarar en porositet på 43 ± 3 procent.

För ett alternativt buffertmaterial, med samma montmorillonithalt men en annan korndensitet, behöver densitetens specifikation ändras för uppnå samma tätande egenskaper. Relationen mellan porositet, densitet och korndensitet beskrivs av enkla geotekniska samband. Korndensiteten för ett stort antal alternativa buffertmaterial är bestämda /24-4/.

För väggbufferten i SFR-silon finns krav både på låg hydraulisk konduktivitet för att förhindra vattenströmning och ett måttligt svälltryck för att inte skada betongkonstruktionen. Detta ställer krav både på en högsta och lägsta densitet i materialet. Väggbufferten har en torrdensitet som ligger på runt 1 000 kg/m³ för de lägsta 15 metrarna, 990 kg/m³ för intervallet 15–30 meter och 980 kg/m³ för 30–50 meters höjd. Detta motsvarar mättade densiteter på 1 650, 1 625 respektive 1 600 kg/m³ /24-5/.

Bottenbädden i silon består av en 10/90 blandning av bentonit och ballast. Den installerades med en torrdensitet på 2 170 kg/m³ (mättad densitet 2 370 kg/m³). Toppbädden förutsätts att få samma egenskaper som toppbädden.

24.1.4 Strålintensitet

Dosraten på kapselytan beräknades i SR-Can till maximalt 500 milligray per timme (mGy/h). Strålningen domineras av nukliden Cs-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. I Forsmark förväntas temperaturen i berget att vara runt 10 °C. Temperaturen beror till viss del på hanteringssekvensen, var buffertblocken har lagrats, värme från deponeringsmaskinen, årstid med mera. 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 24.2.3.

24.1.6 Vattenhalt

I SR-Site antas de kompakterade bentonitblocken ha en initial vattenkvot av 17 procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad i blocken av mellan 75 och 85 procent. Pelletsarna i spalterna mellan bufferten och berget antas ha en initial vattenkvot av 10 procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad av cirka 15 procent om inte spalten fylls med vatten. Spalterna mellan bufferten och kapseln, samt mellan bufferten och berget, kan eventuellt fyllas med vatten, men i SR-Site antas att de är torra.

Vid horisontell deponering enligt KBS-3H-metoden antas den initiala vattenkvoten vara 10 procent i ringarna runt kapseln och 17 procent i de cylindriska blocken vilket ger vattenmättnadsgraden cirka 45 procent i ringarna och cirka 75 procent i de cylindriska blocken.

Planerad teknikutveckling som relaterar till vattenhalt i bufferten presenteras i kapitel 12.

24.1.7 Gashalter

Den initiala gashalten ges av vattenhalten och porositeten. Bentonitblocken har en vattenmättnadsgrad som är mellan 75 och 85 procent. Det betyder att 75 till 85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft, det vill säga gashalten (räknad som volym gas delat med total volym porer) är mellan 15 och 25 procent. Den yttre pelletsfyllda spalten har en gashalt på cirka 85 procent. Luften i ett deponeringshål upptar cirka 16 procent av totala volymen buffert. Osäkerheterna i gashalter är inte betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten.

24.1.8 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gastyck. 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 gastyck (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 undertryck är av storleksordningen 40 MPa.

24.1.9 Lastsituation

Initialt finns inget svälltryck. De initiala trycken kommer från tyngden av ovanliggande bentonitblock och (för undre blocket) kapseln. Svälltrycket utbildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med vatten.

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.

Bufferten i silon i SFR består av ungefär 6 000 m³ av GEKO/QI, vilket är en natriumkonverterad kalciumbentonit. Där är kravet att montmorillonithalten ska vara minst 65 procent.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI anser att en kravspecifikation som till exempel enbart innefattar enkla fysikaliska egenskaper som täthet och svälltryck är otillräcklig. Detta beror på att bentonit har en komplex och varierande kemisk och mineralogisk sammansättning, som har betydelse för buffertens långsiktiga utveckling.

SKI anser att SKB förutom att ange en minimal halt av montmorillonit (som ger bentonitens gynnsamma tätande egenskaper) även behöver ange haltintervall för andra mineral som kan ha en påverkan på långsiktig säkerhet. Det är till exempel väl känt att vissa spårmineral har stor betydelse för buffertens geokemiska utveckling. Kärnavfallsrådet anser att SKB bör ha en kvalitetskontroll avseende bentoniten som omfattar den totala mineralsammansättningen såväl som koncentrationen av föroreningar.

SKI anser det vara positivt att SKB har breddat sitt program för tester av buffertmaterial. I anslutning till detta bör SKB ta fram en plan för vilka material som olika nya försök ska innefatta, för att utnyttja resurser på ett optimalt sätt.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Smektithalten (huvudsakligen montmorillonit) i kommersiella bentoniter ligger normalt på cirka 80 procent. För att uppfylla buffertens densitetskrav måste montmorillonithalten ligga i intervallet 75–90 procent. Smektithalten (huvudsakligen montmorillonit) i kommersiella bentoniter ligger normalt på cirka 80–85 procent. Det kan noteras att i stort sett alla bentonitleveranser som SKB låtit analysera ligger inom det sist nämnda intervallet. Bentonitmaterial för blocktillverkning kommer att genomgå en omfattande kvalitetskontroll före pressning, se avsnitt 12.2.1, kontroll- och mätmetoder. Vid den kontrollen bestäms bland annat montmorillonithalten.

Till bentonitens föroreningar räknas alla mineral utöver montmorillonit. Dessa kallas även assessoriska mineral. 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 24.2.18. Det kan inte uteslutas att sulfidmineral (till exempel pyrit) i bufferten kommer att påverka kapselkorrosionen och det finns därför ett kriterium för hur mycket sulfid som totalt får finnas i bufferten. Kriteriet har satts till att < 0,5 procent av buffertens massa får bestå av svavel i form av sulfid. Om bufferten innehåller kol kan sulfid även bildas från sulfat med hjälp av sulfatreducerande bakterier. Därför har ett krav på totalsvavel och totalt organiskt kol definierats. Båda dessa är satta till mindre än en viktprocent.

Så länge kraven på montmorillonit och svavelhalt samt halten av organiskt kol är uppfyllda finns i dag inga krav på de övriga assessoriska mineralen.

Tidigare studier /24-4/ har visat att det finns små skillnader mellan olika bentoniter när det gäller svälltryck och hydraulisk konduktivitet för det densitetsintervall som är aktuellt för bufferten. Det är dock uppenbart att olika bentoniter kan ha olika egenskaper i många andra avseenden. Dessa behöver nödvändigtvis inte ha någon som helst betydelse för funktionen i ett slutförvar. SKB bedriver dock ett program för att studera olika egenskaperna hos olika typer under relevanta förvarsförhållanden. Arbetet drivs i projektet Alternativa Buffertmaterial som presenteras i avsnitt 24.2.17.

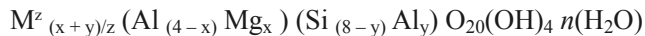
Program

Programmet med studier av alternativa material fortsätter främst inom projektet ABM (underjordsförsöket Alternativa Buffert Material), vilket presenteras i avsnitt 24.2.17.

Karakteriseringen av GEKO/QI gjordes på 1980-talet. Det skulle kunna vara av värde att göra en ny mineralogisk undersökning.

24.1.11 Montmorillonitsammansättning

Mineralet montmorillonit karakteriseras av nanometertunna mineralflak med den ideala strukturformeln:



där M representerar positivt laddade motjoner och z är medelvalensen hos motjonerna. Summan av x och y kan per definition variera mellan 0,4 och 1,2 enheter (laddning per $O_{20}(OH)_4$), 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 tvåvärt aluminium mot tvåvärt magnesium leder till en negativ nettoladdning i mineralflaken som balanseras av motjonerna (M). I naturliga system förekommer dessutom andra substitutioner, till exempel kan järn ersätta aluminium i viss omfattning. En varierande mängd vattenmolekyler (n) kan inkorporeras mellan mineralflaken.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I programmet ingick planer för att vidareutveckla det svällande mineralets strukturformel, med fokus på att bestämma järnets valens. Elementanalys med transmissionselektronmikroskop (TEM) planerades för att statistiskt studera variationen i montmorillonitstrukturen i ett givet buffertmaterial.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Ett relativt stort antal bentoniter har undersökts med XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) för att bestämma järn (II)/järn (III) relationen. Studien har genomförts vid MAX-lab i Lund och kommer att publiceras under år 2010. Inom Lot-projektet har TEM-studier genomförts för att bestämma elementfördelningen i montmorillonitmineralet, se avsnitt 24.2.17.

Program

En undersökning av den statistiska variationen med avseende på flakladdning, jonslagsfördelning och flakstorlek planeras för montmorillonit från några olika bentoniter.

24.1.12 Porvattensammansättning

När vatten tas upp i bentoniten kommer detta företrädesvis att hydratisera montmorillonitens motjoner, se avsnitt 24.1.11. Det är därmed inte möjligt att särskilja motjoner från övriga positivt laddade joner i porvattnet. Det verkliga joninnehållet i porvattnet beror således på montmorillonitens motjoner och på lösligheten hos de accessoriska mineralen. I princip är det möjligt att bestämma jonernas aktivitet genom att jämvikta materialet med en extern lösning (mekaniskt separerad exempelvis via ett metallfilter). Vid jämvikt är det emellertid stora skillnader i samtliga joners koncentration mellan porvattnet och den yttre lösningen som en följd av att montmorillonitens flakladdning måste kompenseras. Se vidare avsnitt 24.2.14.

Vid leverans kommer vattenkvoten att vara maximalt 12 procent enligt dagens specifikation. Före pressning till block tillsätts avjoniserat vatten för att nå en vattenkvot på 17 procent. Buffertmaterialiet kommer att analyseras med avseende på ingående mineral, samt på joner i supernatanten hos dispergerat material (vattenlösningen ovanför uppslammat och centrifugerat prov). Denna kvantifiering ger en möjlighet att beräkna porvattnets initialsammansättning.

Programmet som relaterar till porvattensammansättning beskrivs i avsnitt 24.2.18.

24.1.13 Konstruktionsmaterial

I dagsläget förväntas inte att några konstruktionsmaterial lämnas kvar i deponeringshålen. Däremot planeras det fortfarande för en bottenplatta i cement och koppar som avjämning i botten på hålen, se avsnitt 12.2.1. I SR-Site behandlas denna som en egen systemdel.

24.2 Processer i buffert och återfyllning

24.2.1 Översikt av processer

Buffert och återfyllning

De processer som förväntas påverka buffertens utveckling efter förslutning kan delas in i strårelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C). En sammanställning av processerna återfinns i tabell 17-1. Den kemiska utvecklingen i buffert och återfyllning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser.

Eftersom återfyllningen i likhet med bufferten ska utgöras av högkompakterade block av 100 procent bentonit med en spalt mot berget som fylls med bentonitpellets, blir alla processer mycket lika de som är i bufferten. Den största skillnaden mot det tidigare konceptet med in situ-packad bentonit/sand-blandning är, att ett antal kritiska processer såsom självläkning av erosionskanaler, kompressibilitet vid uppsvällning av buffert, hydraulisk konduktivitet vid höga salthalter och frysning är mindre kritiska på grund av att densitet och bentonithalt är högre. Däremot är skillnaden mellan egenskaperna (främst kompressibiliteten) vid torra och vattenmättade förhållanden större än för in situ-packade blandningar.

Fyra olika material har använts för att beskriva möjliga egenskaper och modeller hos tänkbara återfyllningsmaterial. Dessa material är Friedlandlera, Asha 230 (en indisk natriumdominerad bentonit med cirka 80 procent montmorillonit), IBECO RWC-BF och MX-80. För närmare beskrivning av dessa se /24-6, 24-4/.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i buffert och återfyllning. Många processer i buffert och återfyllning är kopplade och behöver studeras integrerat. Dessa beskrivs i avsnitt 24.2.11.

Silobuffert

Under fyllningsskedet hålls berggrummet runt silon i SFR dränerat och vattenupptaget i bufferten kommer att vara obetydligt. Bottenbädden komprimeras som en följd av att silon fylls. Vid förslutningen installeras toppbädden. När dräneringen stängs av bötjar vattenmättnaden i bufferten.

När bufferten är vattenmättad utbildas fullt svälltryck mot betongkonstruktionen. Detta tryck kan öka när grundvattnet blir mer utspädd. Kalcium från betongen kommer att jonbyta med natrium i bentoniten. Betongporvattnets pH kommer att påverka montmorilloniten i bentoniten, vilket innebär att nya mineral kommer att bildas. Under permafrostförhållanden kan silon frysa.

24.2.2 Stråldämpning/värmealstring

Gamma- och neutronstrålning från kapseln dämpas i bufferten. Dämpningens storlek beror främst på 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

Värmetransport är en viktig process i bufferten som påverkar temperaturutvecklingen i närfältet. Processen är av mindre betydelse i återfyllningen och i silobufferten, och nedanstående text fokuserar därför på bufferten.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs kopplingen mellan temperaturkriteriet för bufferten och den termiska dimensioneringen av Kärnbränsleförvaret, samt planerna för fortsatt arbete med simuleringarna av den Termo-Hydro-Mekaniska (THM) utvecklingen. I samband med granskningen av Fud-program 2007 efterfrågar SKI en bättre motivation till temperaturkriteriet 100 °C, eftersom temperaturen är en viktig faktor för många processer i bufferten. SKI påpekar att en noggrann analys av den termiska utvecklingen förutsätter väl kartlagda kopplingar till den hydrauliska och bergmekaniska utvecklingen.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

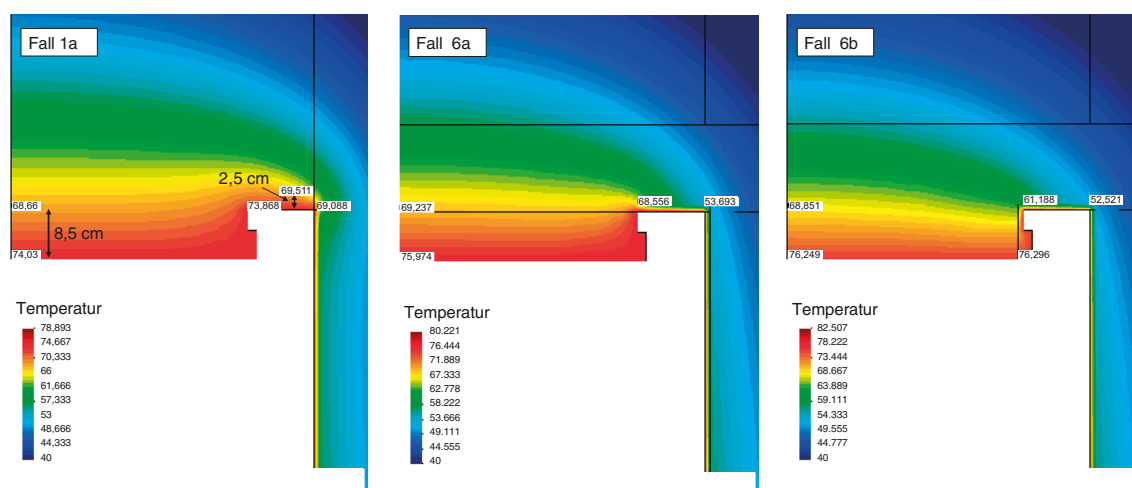
Beräkningsmodellen för temperaturutveckling i buffert och berg har gett dimensionskriterier för tunnel- och kapselavstånd. Resultaten finns redovisade i den så kallade dimensioneringsrapporten /24-7/. Dimensioneringen utgår från det hypotetiska fallet att alla kapselpositioner är torra, så att man inte tillgodoräknar sig någon ökning av bentonitblockens eller pelletsspaltens värmeledningsförmåga på grund av vattenuptag under de cirka tio år som skiljer mellan tiden för deponering och tiden för temperaturmaximum. Följaktligen räknar man också med att den isolerande luftspalten mellan kapsel och bentonitblock finns kvar vid tiden för temperaturmaximum.

För värmetransporten genom bufferten antas att buffertens effektiva värmeledningstal, det vill säga det vägda block-pelletsvärmeledningstalet, är cirka en watt per meter och grad kelvin, (W/mK). Vid dimensioneringsberäkningarna tar man hänsyn till osäkerheter i buffertens värmeledningstal orsakade av, till exempel osäkerheter i vattenmättnadsgrad och portal. Osäkerhetsmarginalen är cirka tre grader, vilket svarar mot ett lägsta effektiva värmeledningstal av cirka 0,85 W/(mK). För dimensioneringsberäkningarna är osäkerheten i buffertens effektiva värmeledningstal det dominerande bidraget till den totala osäkerheten i beräkningen av den maximala bufferttemperaturen för de hetaste kapslarna i förvaret. Kontrollberäkningar med numeriska Code Brightmodeller visar att uttorkningseffekter, det vill säga omfördelning av vatten på grund av förångning och ångdiffusion från de hetaste buffertdelarna till svalare delar och till återfyllningsmaterialet ovanför bufferten och i tunneln, inte påverkar det effektiva buffertvärmeledningstalet tillräckligt för att motivera en större marginal.

I den så kallade THM-rapporten för geosfären /24-8/ görs en analys av de konsekvenser man skulle behöva beakta (i termer av antal påverkade kapslar) om den totala osäkerhetsmarginalen av någon anledning skulle visa sig vara otillräcklig. Resultatet diskuteras vidare i avsnitt 25.2.2.

Vilka delar av bufferten som skulle kunna påverkas om marginalen skulle visa sig otillräcklig analyseras i /24-7/. Figur 24-2 visar temperaturkonturer kring övre delen av en kapsel med isolerande luftspalt, det vill säga en torr kapsel. Analysen görs för några olika antaganden om hur luftspalten ser ut kring kapsellockets flänsar. För att analysera effekter av osäkerheter i den lokala värmetransporten räcker det att, som här visa bara bidraget från den lokala kapseln. Oavsett hur luftspalten ser ut i detalj, det vill säga oavsett hur den termiska kontakten mellan fläns och buffert fungerar, så kommer eventuella temperaturöverskott att vara lokaliserade till en liten buffertvolym i fickan som bildas innanför flänsen och till ännu mindre volymer i direkt anslutning till flänsen. 2,5 centimeter ovanför flänsen kommer bufferttemperaturen att vara under designtemperaturen även om marginalen i dimensioneringsberäkningarna skulle ha underskattats med 4–5 grader.

Under förutsättning att buffertmaterialets termiska egenskaper kommer att vara som i Prototypförvaret, tycks det inte finna något skäl att utöka osäkerhetsintervallet i beskrivningen av bufferten effektiva värmeledningstal. Till exempel visar termiska simuleringar av olika hål i Prototypförvaret att blockens värmeledningstal ligger över 1,25 W/(mK) i såväl torra som våta hål /24-9/. Noggrannheten i beräkningarna och i de mätdata som används för jämförelse är dock inte tillräcklig för att man ska kunna reducera osäkerhetsintervallet. Mindre avvikelser från förhållandena i Prototypförvaret, det vill säga mindre variationer i vattenmättnad och portal, kommer att rymmas inom det intervall som nu gäller i dimensioneringsberäkningarna för layout D2.



Figur 24-2. *Temperaturer i närheten av kapsellocket för kapslar som deponeras i torra hål. Fall 1a: Den isolerande luftspalten sträcker sig längs den vertikala kapselytan medan flänsens överkant och insida är i direkt termisk kontakt med bufferten. Fall 6a: Den isolerande luftspalten sträcker sig längs den vertikala kapselytan och längs flänsens överkant medan flänsens insida är i direkt termisk kontakt med bufferten. Fall 6b: Den isolerande luftspalten sträcker sig längs den vertikala kapselytan och längs flänsens överkant och insida.*

Program

Utvecklingen när det gäller materialval, förändringar i design med mera, måste bevakas så att det inte uppstår förändringar i den effektiva buffertkonduktiviteten som innebär att temperaturmarginerna måste uppdateras inför kommande designsteg.

Konduktivitet hos pelletsspalten kan potentiellt vara känslig för små förändringar i material, storlek hos pelletsen, densitet och vattenmättnadsgrad hos pelletsen med mera. Den effektiva buffertkonduktivitet som ansätts i /24-7/ baseras på att pelletsspalten har egenskaper ungefär som pelletsspalten i Prototypförvaret.

24.2.4 Frysning

När vatten genomgår fasförändring till is ökar volymen (cirka 9 procent). Om vatten i bentonitbufferten fryser förväntas därför trycket att öka vilket skulle kunna skada kapsel och berg.

Frysunkten hos bentonit beror på vatteninnehållet (densitet), men är generellt sett lägre än hos rent vatten, som vid atmosfärstryck fryser vid 0 °C. Frysunksänkningen i bentonit är helt analog med den i vanliga saltlösningar. För vattnet i bufferten ligger frysunkten mellan -5 °C och -10 °C. Allt vatten fryser inte vid en och samma temperatur och temperaturer under -40 °C krävs för att frysa allt vatten i bufferten.

Bufferten påverkas emellertid även av att omgivande grundvatten fryser genom att svälltrycket sjunker. Trycksänkningen är approximativt linjär med temperaturen och svälltrycket är noll vid bentonitens frysunkt. Även denna effekt är helt analog med hur det osmotiska trycket sjunker i en saltlösning med sjunkande temperatur under 0 °C.

För en intakt buffert är således skadliga tryckökningar till följd av frysning inget problem, då temperaturen inte kommer att understiga frysunkten ens i det mest extrema permafrostscenariot (-2 °C) /24-10/. Vidare utgör svälltrycksänkningen ovanför frysunkten inget problem, då denna effekt kräver att omgivande grundvatten är fruset.

Frysning av bufferten kan däremot inte uteslutas om densiteten av någon anledning sänks, exempelvis genom erosion, se avsnitt 24.2.20. Det maximala trycket vid den lägsta temperaturen i det mest extrema permafrostscenariot kan dock gränssättas till 26 MPa.

Frysning sker på samma sätt i alla bentonitmaterial och processen är därför relevant också för återfyllningen. Den lägre montmorillonithalten i återfyllningen ger en högre fryspunkt i jämförelse med bufferten. En återfyllning närmare marknivå kommer också att utsättas för lägre temperaturer än de predikterade för bufferten. Det går därmed inte att utesluta att delar av återfyllningen kommer att frysa.

I SFR kommer temperaturen att sjunka till under -5 °C efter cirka 45 000 år. Vid den temperaturen kan bentoniten frysa. Bentoniten kommer dock efter frysning och tining att ha kvar sina svällande egenskaper och den fungerar som diffusionsspärr under de tidsrymder området inte är fruset /24-11/. Bentoniten i den vertikala spalten mellan betongsilon och berget kommer att uppvisa islinsbildning /24-11/. Islinsbildning är en process som innebär att vatten sugas in i den frysande bentoniten där det ansamlas i isskikt som successivt växer i tjocklek. Isskikten växer normalt i en riktning parallellt med värmeflödet. I detta fall där frysfronten är horisontell, kommer isskikten att växa i tjocklek vertikalt. Drivkraften för denna process kommer från det ofrusna vattnet som har en potential som är lägre än den i omgivande fritt vatten. Denna lägre potential är en följd av att vatten inte fryser vid 0 °C , utan vid en lägre temperatur. Fenomenet är vanligt i naturliga jordlager och benämns då tjällyftning. Islinsbildningen kan medföra öppning av sprickor i det omgivande berget. De öppnade sprickorna orsakar att svällande bentonit pressas ut i sprickorna i samband med upptining. Detta kan medföra viss materialförlust och minskad densitet hos bentoniten. Permafrostens längd i tiden kommer inte att ha betydelse för lyftningarna till följd av islinsbildningen. Det som är avgörande för lyftningarnas storlek är tiden det tar för frysfronten att passera förvaret.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

För att verifiera teorierna och slutsatsen att inget vatten fryser vid temperaturer över -5 °C behöver fortsatta teoretiska studier och laboratorieförsök göras.

SKI anser att SKB skulle behöva utvärdera kvarvarande osäkerheter för att få en säkerhetsmarginal mot frysning. SKI anser också att konsekvenserna av frysning, även för en partiellt eroderad buffert behöver utredas.

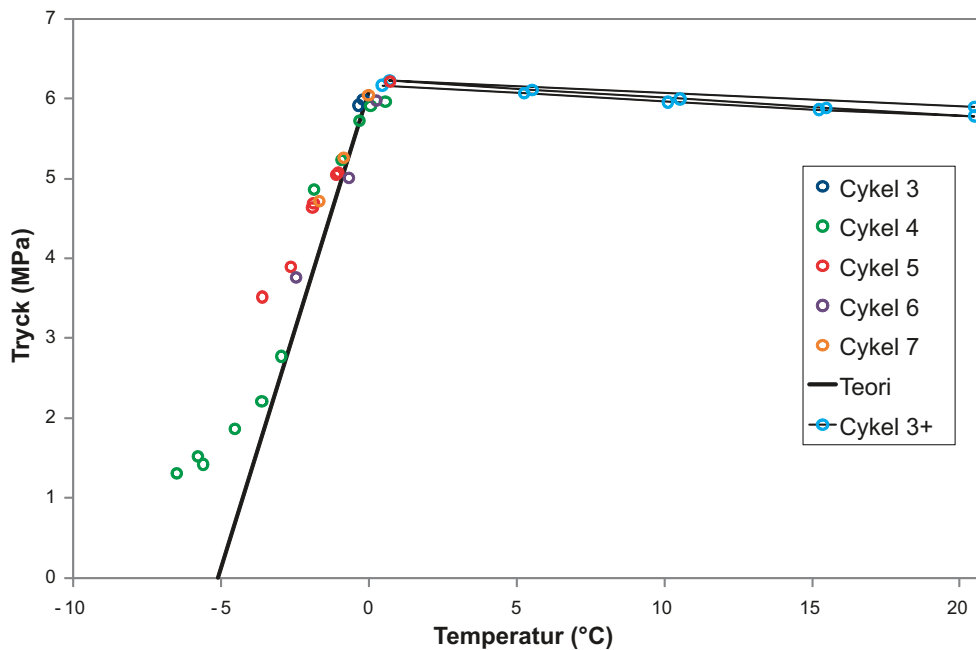
I granskningen av SAR-08 påpekar SSM att antagandet, att bentoniten runt silon återfår sina skyddande egenskaper efter en frysning/tinings-cykel och att bentoniten runt silon inte påverkas av en degradering av de omslutna betongbarriärerna, behöver underbyggas bättre.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

En teori för svälltryckets temperaturberoende har utvecklats. Teorin är baserad på samma konceptuella bentonitmodell som även har applicerats på exempelvis jondiffusion, svälltryckets beroende på salthalt och gasgenombrott /24-12/. Enligt teorin är frysprocessen i bentonit analog med den i en saltlösning. Specifikt så förutsäger teorin att inga tryckökningar sker då temperaturen passerar 0 °C samt att svälltrycket sjunker approximativt linjärt med temperaturen under 0 °C , se figur 24-3. Svälltryckstappet är i storleksordningen en MPa/°C och bestäms i huvudsak av entropiskillnaden mellan vatten i is- och flytande form. Detta betyder att frysningen i stort sätt sker identiskt i alla bentonitmaterial – den enda styrande parametern är endast det uppmätta svälltrycket vid noll grader. En följd av detta är att fryspunkten i ett och samma bentonitmaterial varierar kraftigt med vatteninnehållet (mellan 0 och $< -40\text{ °C}$).

Omfattande laboratoriestudier på ett flertal bentonitmaterial har verifierat i princip samtliga förutsägelser från den aktuella teorin. Till exempel har reversibiliteten i processen demonstrerats i tester med upp till sju frysning/tinings-cykler. Försökstekniken har dessutom visat sig användbar för att bestämma grundläggande termodynamiska egenskaper hos bentonit.

En kompletterande studie har genomförts vilken gränsätter trycket för en given temperatur i ett fruset bentonitsystem. Resultaten visar att trycket inte blir skadligt högt på kapseln även för fallet med en starkt eroderad buffert.



Figur 24-3. Jämviktstryck vid olika temperaturer för ett och samma bentonitprov (MX-80 vid ungefärlig buffertdensitet). Provet har utsatts för totalt sju frysnings/tinings-cykler under en period av cirka två år. Den grova heldragna linjen visar förutsägelsen från den utvecklade teorin. Även den svaga negativa lutningen vid temperaturer över 0 °C är helt enligt teorin. Från /24-12/.

Program

Ur säkerhetsanalysperspektiv så anses inte ytterligare studier av frysning av bufferten nödvändiga. Att använda svälltryckets temperaturberoende för att kvantifiera grundläggande termodynamiska egenskaper hos bentoniten kan dock vara givande för ökad förståelse av en mängd andra processer som exempelvis svällning, jonbyte och kolloidbildning. För återfyllningen kan eventuella tryck-effekter på grund av frysning i bergutrymmen med vertikal utsträckning behöva utredas, exempelvis för kombinationer av förvarsdelar som återfyllningstunnlar och schakt.

Beskrivningen av frysningen av silon kommer att uppdateras. Arbetet kommer att baseras på det underlag som beskrivs ovan /24-12/.

24.2.5 Vattentransport vid omättade förhållanden

När buffertblocken och pelletsfyllningen installerats i ett deponeringshål 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 på temperatur, densitet, smektithalt och vattenkvot i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är relativa fuktigheten i bufferten, som kan ses som ett kapillärt undertryck i buffertens porer vilket leder till att vatten tas upp från berget. De hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet avgör mättnadsförloppet 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.

Samma modell kan användas för buffert och återfyllning och samma parametrar behövs som indata till modelleringen, men värdena avviker eftersom materialen inte är identiska. Vattentransport under omättade förhållanden behandlas även i avsnitt 24.2.11.

I SFR kommer driftfasens dränagepumpning att upphöra då förvaret försluts. Den hydrogeologiska modellen /24-13/ har använts för att beräkna hur lång tid det tar att fylla och mätta förvaret med grundvatten. Beräkningarna visar att tomrummet (porositeten) som finns inuti siloförvaret mätts sist och att detta kan ta 25 år.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Fortsatt laboratorie- och modellutvecklingsarbete planerades för att ytterligare öka förståelsen och förbättra modellerna för bevättningsprocesserna. Modellberäkningar av de olika fältförsöken i Äspölaboratoriet och jämförelser med mätdata planerades, se även avsnitt 24.2.11. Eftersom den hydrauliska samverkan mellan bufferten och berget är avgörande för bevättningsförloppet, föreslogs även ett fältförsök i Äspölaboratoriet.

SKI ansåg i sin granskning att SKB behöver analysera återmättningsförloppet i mycket täta bergarter. SKI ansåg också att SKB bättre bör motivera temperaturkriteriet för bufferten och mera ingående utreda risken för uttorkning samt studera följderna av att bufferten förblir omättad under lång tid.

I Fud-program 2007 planerades laboratorieförsök på främst Friedlandlera. Modellering av bevättningsförloppet för återfyllningen under olika hydrauliska förhållanden planerades också, främst för återfyllning av Friedlandlera med block och pellets.

SKI efterlyste tydligare besked om hanteringen av randvillkoren för modellering av den tidiga hydrauliska utvecklingen och hur bergets hydrauliska egenskaper ska representeras. SKI anser också att växelverkan mellan återfyllning och buffert behöver studeras för fallet att berget är relativt tätt samt att studier av återfyllningen i ”torrt berg” blir viktigare om Forsmark väljs.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Laboratorieförsök av vattentransport i bentonit under olika temperaturgradienter vid olika densiteter har utförts. Resultaten från dessa försök kommer att användas för att uppdatera materialmodellen.

Modellering av laboratorieförsök och fältförsök och jämförelser med mätdata som gjorts inom TF EBS (Task Force Engineered Barrier Systems) har ökat erfarenheterna och förståelsen för omättad vattentransport. De fältförsök som modellerats är ITT (IsoThermal Test) och BCE (Buffer/Container Experiment) i URL Kanada samt CRT (Canister Retrieval Test) i Äspölaboratoriet, varav modellering av den senare fortfarande pågår.

Bevättningsberäkningarna för SR-Site /24-14/ har föregåtts av en kvalificeringsprocess av de parametervärden som skulle utgöra indata till de olika modellerna. Tillvägagångssättet var att jämföra tidigare använda materialsamband och parametervärden med utvärderade samband från nya mätningar (hydraulisk konduktivitet) eller genom att visa på samstämmighet med oberoende mätningar (termisk konduktivitet och vattenhållningsegenskaper).

Tidsskalan för buffert- och återfyllnadsbevätningen undersöktes för ett antal modeller där olika parameterstudier utfördes. Beräkningarna skiljer sig från modellerna i SR-Can med avseende på:

- Beskrivningen av ångtransport (enbart buffertbevätning), vilken i projektet SR-Site formuleras direkt som diffusion (ångkoncentrationsgradient snarare än temperaturgradient).
- De använda randvillkoren (och modelldimensionerna), vilka i projektet SR-Site är mer realistiska och motiverade med tanke på platsdata.
- Mekanisk påverkan (från homogenisering) har i projektet SR-Site indirekt beaktats genom att modellera både ursprungliga och homogeniserade tillstånd.

Bergets egenskaper (hydraulisk konduktivitet, sprickförekomst med mera) visade sig ha stor betydelse för mättnadstiden. Variationer i buffertens hydrauliska egenskaper (vattenhållning och permeabilitet) resulterade inte i lika betydande förändringar som när bergets egenskaper varierades.

Fuktomfördelning har studerats för en situation med torrt (tätt) berg, för att på så sätt ta fram kritiska värmeledningstal för olika områden i bufferten (för användning i temperaturberäkningar). I Finite Element Method-modellen (FEM) antogs berget vara hydrauliskt inaktivt. Efter 15 år av fuktomfördelning återfanns den lägsta blockmättnaden vid toppen av kapseln och den pelletsfyllda spalten hade ökat sin vattenmättnadsgrad /24-14/.

En andra analys rörde ventilation av deponeringstunnlarna och den eventuella uttorkningen av det omgivande berget /24-14/. Det luftfyllda porutrymmet i berget skulle eventuellt kunna utgöra en sänka för det vattnet som följer med bufferten vid installationen. Syftet med denna studie var

därför att undersöka uttorkningens omfattning som en funktion av bergets egenskaper, i synnerhet vattenhållningsegenskaperna. Den använda metoden kan identifiera parameterkombinationer i vattenhållningsslagen, som kan leda till omfattande uttorkning vid ventilation av deponeringstunnlarna. Analysen visar dock att den gasfyllda porvolymen är avsevärt mindre än den tillgängliga vattenvolymen i den installerade bufferten för fall med rapporterade parametervärden för vattenhållning och relativ permeabilitet.

Laboratorieundersökningar av vattenuptagningssegenskaper och retention har gjorts på Friedlandera, Asha 230 och IBECO RWC-BF. Figur 24-4 visar retentionskurvor bestämda för dessa material och för MX-80 /24-15, 24-16/.

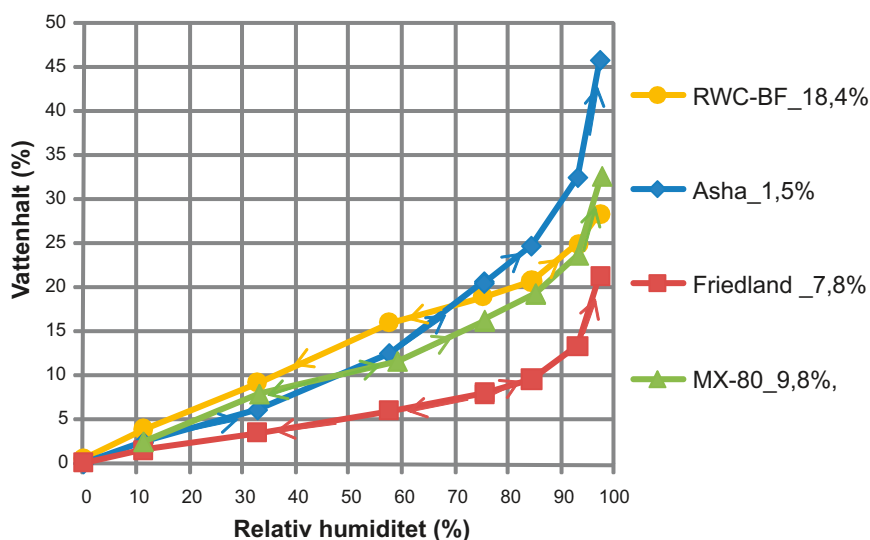
Vattenuptagningssegenskaperna har mätts under konstanta volymförhållanden genom att material med olika densitet har fått stå i kontakt med vatten under olika tider, varefter försöken brutits och vattenmättnadsgraden och portalets fördelning med avstånd från vatteninloppet mätts. Dessa försök avses användas till att kalibrera och validera modellen för vattentransport i omättat tillstånd.

Modellberäkningar av bevättningsförloppet har gjorts för SR-Site för olika hydrauliska förhållanden i berget /24-14/. Vid ytterligheten av fri tillgång till vatten i bergranden blir tiden till full mättnad cirka 80 år och vid en motsatt ytterlighet av ingen spricka och en hydraulisk konduktivitet i berget på 5×10^{-13} meter per sekund blir tiden till full vattenmättnad 1 200 år.

Omfattande försök med storskaliga modeller av en tunnel återfylld med block och pellets har utförts i Äspö. Dessa försök har gett värdefull information om hur återfyllningen reagerar på vatteninflöde under främst återfyllningsfasen /24-17, 24-18/. Se även programmet för teknikutveckling för återfyllningen, kapitel 13.

Program

Frågor angående vattentransport vid omättade förhållanden kräver fortfarande stora insatser under kommande period. Fortsatt modellering av CRT, modellering av TBT (Temperature Buffer Test) som bryts under år 2010 och modellering av Prototypförvarets yttre sektion, som planeras att brytas under 2011, ingår i programmet. Laboratorieförsöken med temperaturgradient kommer att modelleras och användas till kalibrera parametrarna i materialmodellen och eventuellt kommer ytterligare försök att göras.



Figur 24-4. Retentionskurvor för undersökta möjliga återfyllningsmaterial /24-15, 24-16/.

Inom TF EBS kommer deponeringshålen i yttre sektionen i Prototypförvaret att modelleras och det nya försöket Brie (Buffer Rock Interaction Experiment), som avser studera hydraulisk samverkan mellan berg och bentonit vid omättade förhållanden, kommer att modelleras i samverkan mellan de två TF-grupperna Tekniska barriärer (TF EBS) och Grundvattenflöde i berg (TF GWFTS, Task Force Ground Water Flow and Transport of Solutes). Avsikten är att studera både torra och våta förhållanden.

Ytterligare studier av uttorkningsscenarioer vid mycket torrt berg kommer att göras i form av undersökningar av möjlig förekomst av naturlig konvektion i pelletsfyllda spalter och dess eventuella betydelse för uttorkning.

Fortsatta studier av grundläggande mekanismer till stöd för olika transportlagar och val av parametervärden kommer att göras.

Förslag föreligger att undersöka vattenhållningskurvan dels för renade material, det vill säga ren Wyoming Na-montmorillonit (WyNa) och ren Wyoming Ca-montmorillonit (WyCa), dels för material som exponerats för hög temperatur. Inverkan av kornstorleksfördelning, cykler av vattenupptagning-uttorkning, områden med hög relativ humiditet (RH) samt RH-förändringens storlek både vid uppfuktning och uttorkning ingår i frågeställningarna.

Laborariestudierna på olika återfyllnadsmaterial bör fortsätta, speciellt på något material som anses representativt för det material som avses användas. Utvärdering av parametrarna till materialmodellen ska göras med vattenupptagningsförsöken som grund både för använda material och eventuella nya. Beräkningarna ska uppdateras med de nya modellerna.

Avsikten är att modellera vattenmättnadsprocessen i SFR på ett liknande sätt som för bränsleförvaret.

24.2.6 Vattentransport vid mättade förhållanden

Grunden för benonitbuffertens tätande egenskaper är montmorillonitmineralets affinitet för vatten. När porvolymen i bufferten är fylld med vatten leder denna affinitet till en effektiv fördelning av vattnet till ett cirka en nanometer tjockt vattenskikt mellan lerpartiklarna. Fördelningen och den direkta kraftsamverkan mellan vattnet och montmorillonitens motjoner är en effektiv begränsning av vattenrörelser. Vanligtvis anges flödesmotståndet för vatten i form av hydraulisk konduktivitet (K). Referensbentoniterna som studeras inom projektet SR-Site har en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-13} meter per sekund, vilket är av samma storleksordning som sprickfri granit.

Inga tveksamheter råder 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 mindre utredda processer, framför allt förlust av buffert genom kolloidbildning, se avsnitt 24.2.20

Samma modell kan användas för buffert och återfyllning och samma parametrar behövs som indata till modelleringen, men värdena avviker eftersom materialen inte är identiska. Detta resonemang är också giltigt för väggbufferten i silon i SFR. Där är dock densiteten avsevärt lägre och den hydrauliska konduktiviteten blir därför högre.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Enligt Fud-program 2007 skulle efter brytning av Backfill and Plug Test utvärdering av mätta hydrauliska konduktiviteter göras. Eftersom försöket ännu inte brutits kvarstår denna punkt.

Mätningar av hydraulisk konduktivitet på återfyllningskandidater ingick i programmet i Fud-program 2007.

I granskningen av Fud-program 2007 uttrycker SKI åsikten att de aktiviteter SKB har identifierat och påbörjat är lämpliga för att få ett tillräckligt underlag för bedömning av den hydrauliska utvecklingen av återfyllningen. SKI anser även att SKB bör se över omfattning och inriktning på verksamheten vid Äspölaboratoriet som syftar till att förbättra kunskaperna kring implementering av teknologi för buffert och återfyllning.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Hydraulisk konduktivitet har mätts på fältexponerat material i försök i Äspölaboratoriet (Återtagningsförsöket samt ”paket 1” i Alternativa buffertmaterial). Resultaten visar, i enlighet med tidigare resultat från Lot-försöket, en liten tendens till lägre värden i jämförelse med referensmaterial.

Mätning av hydraulisk konduktivitet har gjorts på Friedlandera, Asha 230 och IBECO RWC-BF. Figur 24-5 visar hydrauliska konduktiviteten som funktion av torrdensiteten för dessa material. Resultaten visar som förväntat att tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet kan uppnås av återfyllningsmaterialen om antingen tillräckligt hög densitet eller lämpligt material används. Till exempel krävs en torrdensitet högre än 1 500 kg/m³ om Friedlandera används, men endast cirka 1 300 kg/m³ för Asha 230 och IBECO RWC-BF.

Program

Laboriestudierna på olika buffert- och återfyllnadsmaterial ska fortsätta, speciellt på sådana material som anses representativa för det material som avses användas i Kärnbränsleförvaret. Detta görs för att bredda kunskapen om olika bentonitkvaliteters egenskaper.

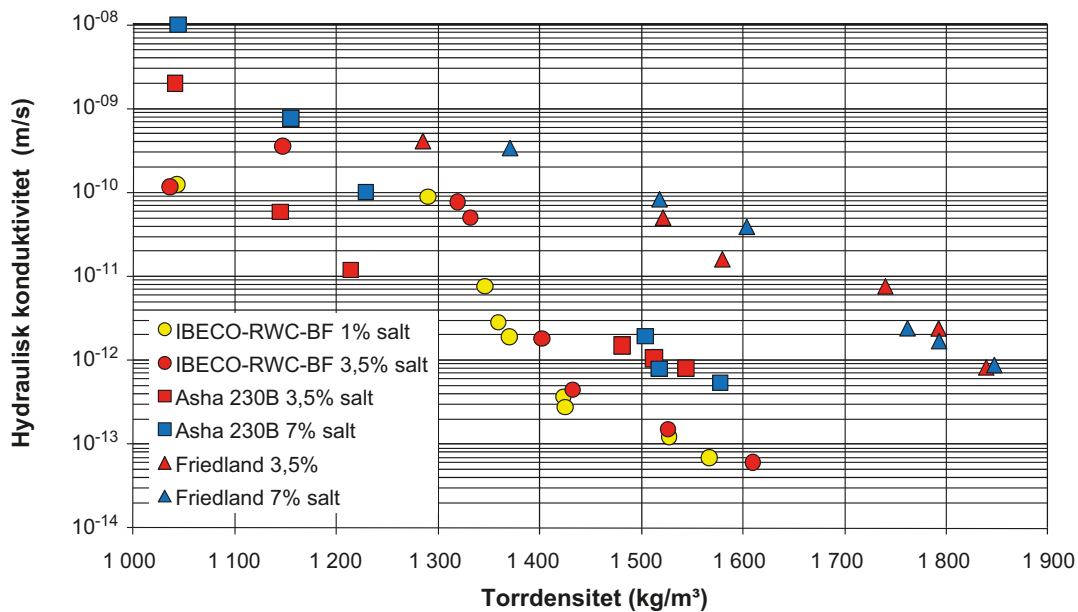
Kontrollmätningar av referensmaterial och material från återtagsförsöket vid Äspölaboratoriet med olika vattentrycksgradienter pågår.

Ett omfattande testprogram kommer att genomföras på material från fältförsöket TBT (Temperature Buffer Test) i Äspölaboratoriet.

Hydraulisk konduktivitet i renad montmorillonit kommer att studeras inom både projekten ”bentoniterosion” och Forge för en stor uppsättning densiteter, vattentrycksgradienter och motjoner. Resultaten hittills visar att den hydrauliska konduktiviteten för en given motjon i stort bestäms av densitetsfördelningen i provet.

Buffertens mycket låga hydrauliska konduktivitet (trots att porositeten är cirka 40 procent) antyder att porvolymens fördelning har en avgörande betydelse för egenskaperna. Laborieförsök kommer att genomföras med syfte att undersöka de grundläggande principerna (advektion/diffusion/dispersion) för vattentransport i bentonit under mättade och volymsbegränsade förhållanden.

Efter brytningen av Prototypförvaret och Backfill and Plug Test görs en utvärdering av densiteter och mätta hydrauliska konduktiviteter.



Figur 24-5. Samband mellan hydraulisk konduktivitet och torrdensitet för undersökta återfyllningskandidater /24-15, 24-19/.

Data för den hydrauliska konduktiviteten för GEKO/QI, som används i SFR, baseras på mätningar som gjordes för mer än 25 år sedan. Det kan vara av värde att upprepa mätningarna och verifiera materialets egenskaper.

24.2.7 Gastransport/gaslösning

Kemiska reaktioner inne i en skadad kapsel kan medföra gasbildning och ett gastryck som byggs 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.

För att den gas som bildas i avfallskollin och betongkonstruktioner i SFR ska kunna ta sig ut krävs att gasförande passager bildas i barriärerna. Gastransporten och mängden förträngt vatten från siloförvaret och bergsalarna bestäms av de ingående barriärernas utformning och barriärmaterialens egenskaper. I siloförvaret omges avfallet av en porös betong med lågt motstånd mot gastransport. För att öppna upp gaspassager i denna krävs endast ett litet gasövertryck och mängden vatten som pressas ut har i experiment uppmätts till 0,1–2 procent av porvolymen /24-20/. I gastransportberäkningarna i SAR-08 har antagits att två procent av porvolymen i betongen kan förträngas. För att gasen ska ta sig vidare ut genom gasavledningsrören och sand/bentonitbarriären i toppen krävs att ett gasövertryck byggs upp i betongsilon som motsvarar sand/bentonitbarriärens öppningstryck. Försök visar att det krävs ett övertryck på cirka 15 kPa för att åstadkomma gastransport genom sand/bentoniten och att det vatten som förträngs endast motsvarar några promille av totala porvolymen /24-21/.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI anser att SKB före ansökan bör redovisa så mycket som möjligt av demonstrationsförsöken på Äspö och att SKB bör överväga risken att experimentet Lasgit inte leder fram till förväntat resultat.

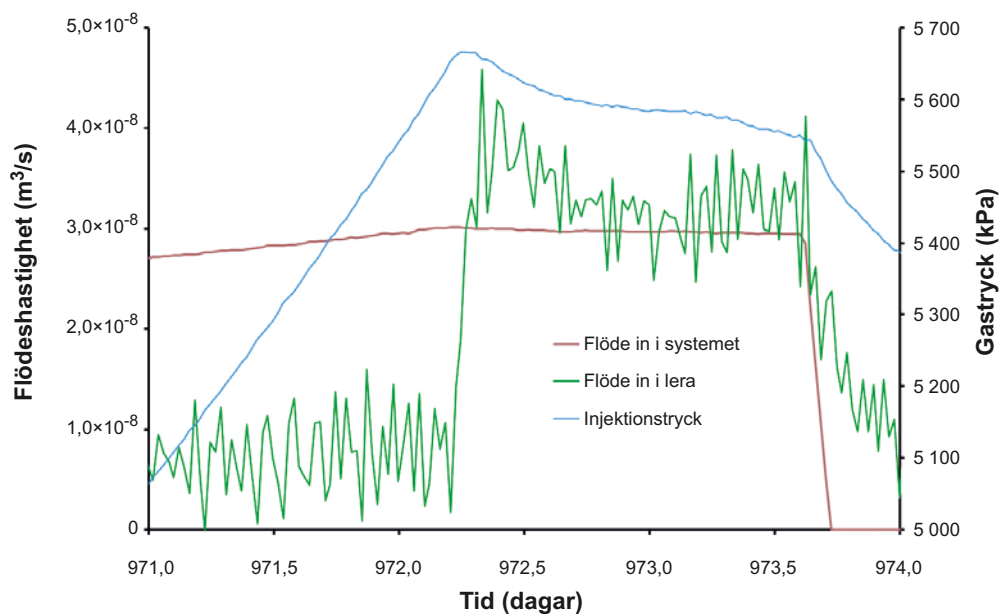
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Under perioden 2007–2009 har alla insatser inom området fokuserats på Lasgit-försöket i Äspö. Lasgit (Large scale gas injection test) togs i drift i februari 2005 och har nu funnits på plats i mer än fem år. I maj 2007 startade ett hydrauliskt test med avsikten att bestämma den hydrauliska konduktiviteten i bentoniten innan gastesterna började. I augusti samma år startade det första gasinjekteringstestet /24-22/. I testet ökade flödet av gas kraftigt när gastrycket på pumpsidan var aningen högre än det lokala totaltrycket mätt på bergväggen, men något lägre än totaltrycket på kapselytan. Den mätta axialspänningen var också något högre än gastrycket. Gastrycket steg sedan upp till ett maximalt tryck av 5,66 MPa efter ungefär två månaders gasinjektering. Efter det kom en kort negativ transient och trycket stannade sedan på en quasi-steady-state runt 5,5 MPa, vilket illustreras i figur 24-6. Beteendet liknar det som har observerats i tidigare laborieförsök /24-23/. Det ska dock poängteras att de maximala tryck som uppmätts i Lasgit är avsevärt lägre än de som rapporteras /24-23/.

För att testa om gasinjekteringen och gasflödet påverkar de hydrauliska egenskaperna hos bufferten genomfördes hydrauliska tester före respektive efter gasinjekteringstesten. Testerna visar tydligt att de hydrauliska egenskaperna har förändrats ytterst lite, eller inte alls, av gasinjekteringen /24-22/. Baserat på de data som finns tillgängliga finns det ingenting som tyder på att de gastransportvägar som bildas skulle ha någon som helst påverkan på buffertens hydrauliska funktion.

Vid installationen av Lasgit användes bentonitblock med hög vattenhalt för att snabba upp vattenmättnaden. Det naturliga inflödet av vatten till deponeringshålet för Lasgit är också relativt högt. Detta betyder att den mängd vatten som behövs för att mätta bufferten redan finns i deponeringshålet. Under testet år 2007 var dock inte bentoniten i mekanisk jämvikt. Det fanns då delar av bufferten där porvattentrycket var negativt. Detta innebär att en viss försiktighet behövs i de slutsatser som dras.

För att utjämna tryckförhållandena och låta bufferten ”mogna i fred” gjordes ingen gasinjektering i Lasgit under hela år 2008.



Figur 24-6. Flöden och tryck runt det maximala gastrycket i det första gasinjekteringstestet i Lasgit. Gasflödet in i bentoniten ökar snabbt efter toppen, vilket sedan följs av en liten spontan negativ transient /24-22/.

År 2009 startade en andra serie med gasinjekteringstester. Denna pågår fortfarande (februari 2010) och resultaten är ännu inte publicerade. En av avsikterna med testet är att undersöka om det finns tidsberoende effekter i gastransportprocessen. Gasinjekteringen startade i maj 2009 i samma filter som testen år 2007. Gastrycket har rampats i steg och har hållits konstant under långa tider. Den sista rampen startade 12/11 2009 med en pumphastighet av 500 mikroliter per timme. Trycket steg till 5 872 kPa efter 25 dagar när ett gasflöde kunde mätas. Trycket sjönk sedan och ett ”steady-state” etablerades vid årsskiftet, se figur 24-7.

Från det andra gastestet kan följande observeras:

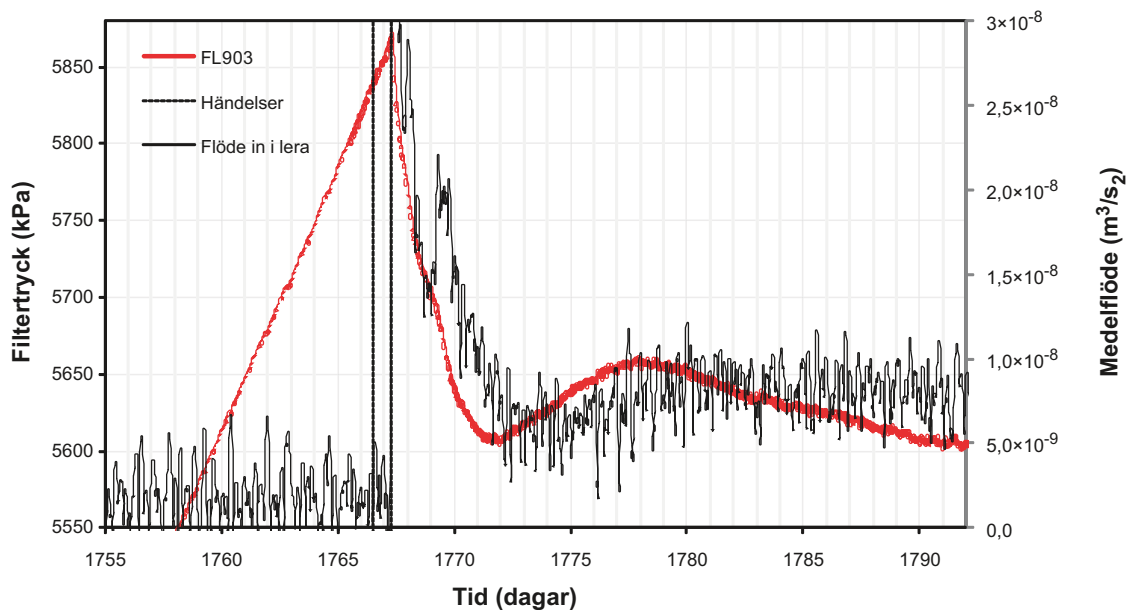
- Gasgenombrottet kom nära totaltrycket, vilket var detsamma i 2007 års test. Detta överensstämmer med den traditionella bilden men skiljer sig från observationer i laborieförsök /24-23/. Det är uppenbart att storleken har betydelse för processen i fråga.
- Beteendet av gasen efter genombrott är komplicerat. Detta illustreras delvis i figur 24-7 där tryck och flöde oscillerar. Processen är därför en utmaning att modellera.
- Instrumenteringen i Lasgit fungerar väl och är tillräckligt känslig för att kunna följa gastransportprocessen.

De observationer som har gjorts i Lasgit stöder på alla punkter den behandling av processen som görs inom SR-Site.

Program

Lasgit ingår som en del i EU-projektet Forge som löper under perioden 2009–2012. Försöken kommer att fortsätta under den tiden. År 2012 kommer resultaten att utvärderas och ett nytt beslut om Lasgits framtid att tas. För att komplettera Lasgit kommer laborieförsök att genomföras för att studera kritiska parametrar som är svåra att utvärdera i ett fullskaletest.

Inga ytterligare studier av gastransport i silon i SFR planeras.



Figur 24-7. Gastryck och flöde i Lasgit i 2009-års test (preliminära data). FL903 = tryck i gasinjektionsfilter FL093.

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.

Processen är densamma för buffert och återfyllning, men effekten kan vara allvarigare för återfyllningen eftersom läkningsförmågan är något sämre för de flesta kandidatmaterialen. Däremot mildras konsekvenserna för säkerheten på grund av avståndet till kapseln och det faktum att massan av återfyllning i en sektion är mycket större än massan buffert.

Processerna och konsekvenserna i samband med kanalbildning och erosion har studerats i några projekt, varvid ett flertal laboratorierier i olika skala har genomförts. Testerna har lett fram till en erosionsmodell som används vid beräkningar av hur mycket bentonit som kan erodera från bufferten. Den kanalbildning och erosion som avses här uppstår i första hand innan full vattenmättnad uppnåtts och kommer att läka igen efter det att full vattenmättnad uppnåtts och vattenflödet stoppats. Homogeniseringen behandlas i avsnitt 24.2.9

För SFR har processen troligtvis ytterst ringa betydelse. Vattentrycket runt silon kommer att återställas snabbt när dräneringen stängs av, vilket ger en kort tid under vilken piping kan förekomma.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades försök med piping i bufferten, främst inom utveckling av KBS-3H. Problemet för KBS-3H var att varje distansblock ska täta så att vatten inte kan rinna mellan två kapselsektioner under vattenmättnadsfasen. Erosion skulle studeras främst för återfyllningsmaterial. I fält kommer resultatet att studeras vid brytning av hål 1 i Prototypförvaret där vatteninflödet vid installationen var 0,08 liter per minut.

Angående bufferten gavs följande kommentarer av SKI:

- SKB behöver öka sin teoretiska förståelse av piping/erosion och utförligare beskriva åtgärderna.
- Kriterier för att välja deponeringshål så att piping/erosion undviks behöver förtydligas inför ansökan.

- Prototypförvaret kan nog ge information om piping/erosion men detta enda försök räcker inte.
- Planerna för piping/erosion är vaga för KBS-3V jämfört med arbetet med KBS-3H.

För återfyllningen gällde att pågående laboratorieförsök av piping och erosion skulle fortsätta och kompletteras med motsvarande försök med andra material. Målet var att gränssätta den mängd återfyllning som kan erodera bort dels innan fullständig tätning med ändpluggen uppnåtts och dels genom intern omfördelning av eroderat material.

SKI ansåg att skillnaderna mellan buffert och återfyllning bör beaktas.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Piping-försöken med KBS-3H visade att distansblocken inte kan täta mot piping och inte kan hindra att vatten rinner mellan sektionerna. Därför har "basic design" övergetts till förmån för två andra varianter varav den ena (Dawe) är det nya huvudkonceptet. I Dawe fylls spalten mellan buffert/distansblock och berg artificiellt med vatten omedelbart efter det att en viss sträcka av deponeringstunnel är färdig. En slutsats av försöken är att piping aldrig kan stoppas av bufferten (varken i KBS-3H eller KBS-3V) om inflödet är så stort att bentoniten inte hinner absorbera det inströmmande vattnet /24-24/. En plugg i änden på deponeringstunneln behövs för att stoppa vattenflödet och skapa ett stagnant vatten utan hydraulisk gradient för att bentoniten ska kunna täta och läka.

Eftersom bentoniten inte själv kan täta måste man anta att deponeringshål och deponeringstunneln måste fyllas med vatten innan erosionen stoppas, varför den totala erosionen från ett deponeringshål kan beräknas. Ett flertal serier erosionsförsök har därför utförts och lett till en empirisk erosionsmodell.

I modellen relateras ackumulerad eroderad bentonitmassa till ackumulerad eroderande massa vatten. Modellen tar hänsyn till erosionsbenägenheten vilken påverkas av geometri, salthalt i det eroderande vattnet, materialsammansättning och flödesriktning. En viktig iakttagelse är att erosionen minskar med tiden oberoende av omständigheterna. Detta har stor betydelse för den totala erosionen.

Erosionsmodellen används för att gränssätta inflödeskraven på deponeringshål i relation till inflöde i tunneln /24-14/. För KBS-3H blir erosionen så pass liten på grund av den lilla volymen tomrum som finns i deponeringstunneln och på grund av att detta tomrum fylls artificiellt) att inga särskilda krav behövs.

För återfyllningen har erosionsförsök utförts både på block av olika återfyllningsmaterial (Friedland-lera, Asha 230 och IBECO RWC-BF) och på olika sorters pelletsfyllningar (MX-80, Cebogel, Minelco och IBECO-RWC-BF) /24-15, 24-25, 24-26/. Resultaten visar att den modell som tagits fram för bufferten också kan användas för återfyllningen.

Räkneexempel på hur stor erosion som kan inträffa i återfyllningen kan enkelt göras med modellen. Vid 80 procent blockfyllningsgrad blir totala tomvolymen i en 300 meter lång tunnel som kan fyllas med vatten cirka 750 kubikmeter. Om man som ytterlighet gör det osannolika antagandet att allt vatten som fyller upp tunneln rinner in i samma punkt, blir den totala erosionen i denna punkt mellan 12 kilo och 1 200 kilo torr bentonit. Pluggens täthet avgör sedan om ytterligare erosion kan förekomma, men precis som för bufferten måste man anta att piping/erosion i återfyllningen inte upphör förrän vattentrycksgradienten tas av pluggen. Eftersom 1 200 kilo bentonit endast medför att medeldensiteten i ett tvärsnitt av tunneln minskar med några procent, kan man dra slutsatsen att erosion av återfyllningsmaterial inte är något problem om man har en tät plugg. Problem kan endast uppkomma i bufferten under liknande extrema omständigheter.

Spricktättningsförmågan när vatten rinner genom en pelletsfyllning och ut i en spricka i berget, har undersökts i laboratoriet i ett antal försök. De hittills uppnådda resultaten i detta pågående arbete indikerar att sprickor med en vidd upp till 150 millimeter självtätar under dessa omständigheter. Om resultaten kan visas vara allmängiltiga betyder det att vattenläckage ut från tunneln är osannolikt. Resultaten är dock förmodligen mycket känsliga för geometrin och det krävs antagligen att pelletsfyllningen är i direktkontakt med sprickan. Mer undersökningar behövs.

Program

Planerna i Fud-program 2007 har mer än fullföljts och hänsyn har tagits till SKI:s kommentarer, så att ett verktyg finns för att formulera inflödeskrav på deponeringshål och täthetskrav på pluggen med hänsyn till buffererosion. Däremot är det önskvärt att ytterligare fördjupa förståelsen för piping och erosion och öka förståelsen för hur olika faktorer påverkar parametrarna i modellen.

Ytterligare erosionsförsök kommer att göras varvid variation av geometrier med mera kommer att ingå för att förbättra förståelsen för hur olika faktorer påverkar parametrarna i modellen.

Täthetskraven på tunnelpluggen är höga och styrs av erosionen i bufferten vilket medför att det är viktigt att undersöka hur och när flödet och erosionen upphör.

Förståelsen för vid vilka inflöden och geometrier piping inte uppstår ska undersökas, eftersom det kan vara svårt att vid tätt berg ställa krav på relation mellan inflöde i deponeringshål och inflöde i tunneln.

För återfyllningen planeras fortsatt stora insatser för att förbättra kunskaperna om

- när piping upphör,
- erosionsmodellens giltighet,
- självtätning av sprickor.

I ett nytt projekt om vattenmättnad, självläkning och homogenisering ska dessa frågor ytterligare belysas genom att scenarieanalyser görs av hela installations- och bevättningsförloppet för buffert, återfyllning och plugg för berg som både är torrt och har olika sprickkonstellationer. Se även avsnitt 24.2.11 och kapitel 13 som beskriver teknikutveckling för återfyllningslinjen.

24.2.9 Mekaniska processer

Svällningsprocessen har slagits samman med andra spännings- och töjningsrelaterade processer som kan förorsaka massomfördelning i bufferten såsom termisk expansion, krypörelser och ett antal interaktioner med kapsel, närområdesberg och återfyllning. Främst avses processer efter full vattenmättnad, men många modelleringar har förenklats och gjorts under antagande att slutresultatet är ganska oberoende av om svällningen och homogeniseringen sker före eller efter full vattenmättnad. Modellerna har emellertid förbättrats under senare år och en del nya homogeniseringsberäkningar har gjorts och ska göras utan denna förenkling, det vill säga under omrättade förhållanden. Dessa redovisas i avsnitt 24.2.5.

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 samt 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,

deponeringshålets ojämnheter och tryckuppbyggnaden vid eventuella gasbildningar. En annan osäkerhet är kryp rörelser hos kapseln orsakade av kapselns tyngd.

Växelverkan mellan buffert och berg orsakas bland annat av svälltryck från bufferten, konvergens av deponeringshål och skjuvrörelser i berget. Konvergens behandlas i avsnitt 25.2.9. Vid horisontell deponering 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 berg rörelser, kommer att svälla igen och läka.

På lång sikt kan kemiska förändringar i bufferten leda till att svällnings- och deformationsegenskaperna förändras, se avsnitt 24.2.16. 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.

Återfyllningens svällnings- och kompressionsegenskaper är viktiga för slutförvarets funktion. Designen med block och pellets i återfyllnaden ställer framför allt krav på homogeniseringsförmågan dels mellan blocken och pelletsfyllningen, dels för läkningen av erosionskanaler, men även svälltrycken och kompressionsegenskaperna är viktiga för till exempel buffertuppsvällning och påverkan på pluggen.

För silon i SFR studeras två typer av rörelser: dels sättning av silons botten, dels förflyttningar i silotoppen. Detta diskuteras i detalj i /24-5/. Mätprogrammet för silotoppens rörelser startade 1987. År 2002 hade toppen rört sig 18,1 millimeter, vilket är lite mindre än prediktionen på 24–27 millimeter. Den huvudsakliga orsaken till rörelser är kompression av bottenbädden.

Efter förslutning kommer bentonitbufferten i silon att vattenmättas och ge ett svälltryck mot betongkonstruktionen och den omgivande sprutbetongen.

Silon i SFR skulle också kunna påverkas av berg rörelser som uppstår i sprickplan från jordskalv. Dessa skulle kunna ge upphov till påkänningar på betongkonstruktionen. Dessa förmedlas från berget genom väggbufferten.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 konstaterades att de mekaniska processerna i bufferten är viktiga för Kärnbränsleförvarets funktion och att både förståelse och modeller behövde förbättras. Följande föreslag till fortsatt forskning angavs:

- Studier av svälltrycksuppbyggnad i bentonit.
- Program med laborieförsök för att studera och modellera svällning.
- Modellering och storskaligt försök i BB (Big Bertha) för att studera utträngningen av bentonit genom perforerade hålen i supercontainern i KBS-3H.
- Utvärdering och modellering av homogeniseringen i det brutna återtagsförsöket.
- Fortsatta studier och modelleringar av kapselskjuvning.
- Studier av det spröda beteendet hos vissa delar av bufferten i Lot-försöken.
- Fortsatta studier av effekten av höga vattentryck på svälltrycket och deformationsegenskaper.

SKI hade följande kommentarer till programmet:

- Övergången mellan icke-eroderad och partiellt eroderad buffert, det vill säga ett tillstånd fortfarande utan advektion behöver utvärderas.
- SKB bör utreda vilka förutsättningar i berget som skulle kunna leda till att bufferten tränger upp i tunneln och hur detta i så fall åtgärdas.

I Fud-program 2007 planerades fortsatta studier av svällnings- och kompressionsegenskaperna hos olika återfyllningsmaterial inom Baclo-projektet. Detsamma gällde undersökningarna av materialens mekaniska samverkan med buffert och berg. Samverkan mellan de inplacerade återfyllningsblocken och den pelletfyllda spalten skulle också studeras, så att initialtillståndet efter full homogenisering blev känt.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Svälltrycksmätningar gjorda på bentonit efter brytning av Återtag- och Lot-försöken visar inte på några förändringar, det vill säga de fältförhållande och höga temperaturer som bentoniten utsatts för har inte påverkat svällningsförmågan.

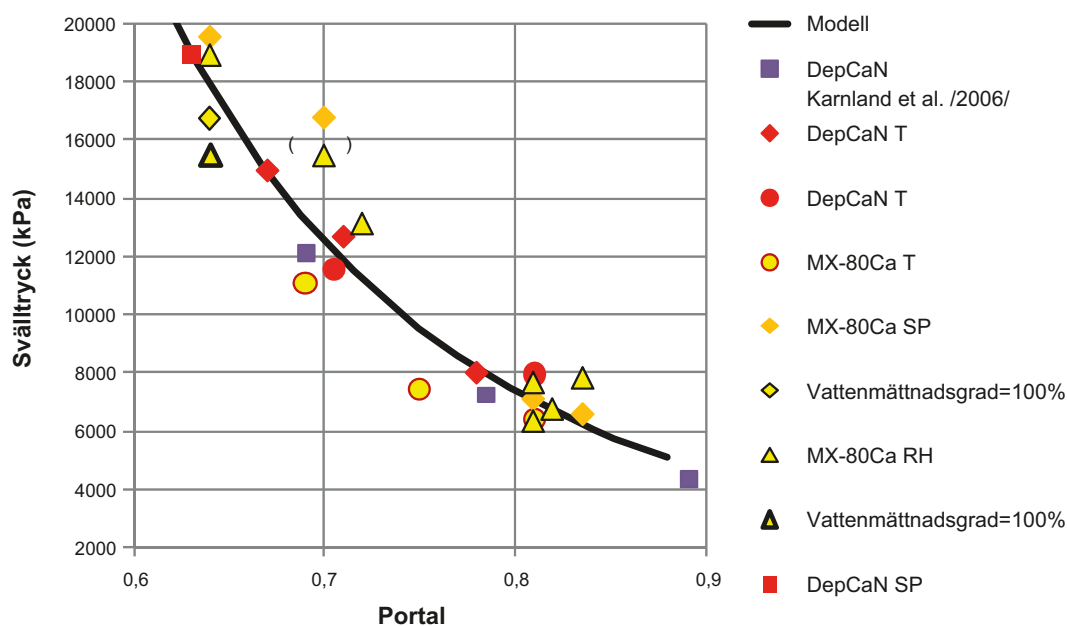
Svälltrycksmätningar på Ca-bentoniter (främst Deponit CaN, men även MX-80Ca som är MX-80 jonbytt till Ca) har gjorts eftersom man inte kan utesluta att bufferten under den långsiktiga utvecklingen jonbyts till Ca. Mätningarna har gjorts med olika teknik och vid olika tillfällen och de ger en samstämmig bild av sambandet mellan svälltryck och portal. Figur 24-8 visar en sammanställning av mätresultaten.

Studier av svällnings- och homogeniseringsegenskaper som planerades som en serie laboratorie-försök har genomförts till viss del. Dessa studier är dock inte färdiga än. Fortsatta studier avser förbättring av kunskapen och modelleringsförmågan angående självläkning och homogeniseringen av partiellt borteroderad buffert som efterfrågades av SKI.

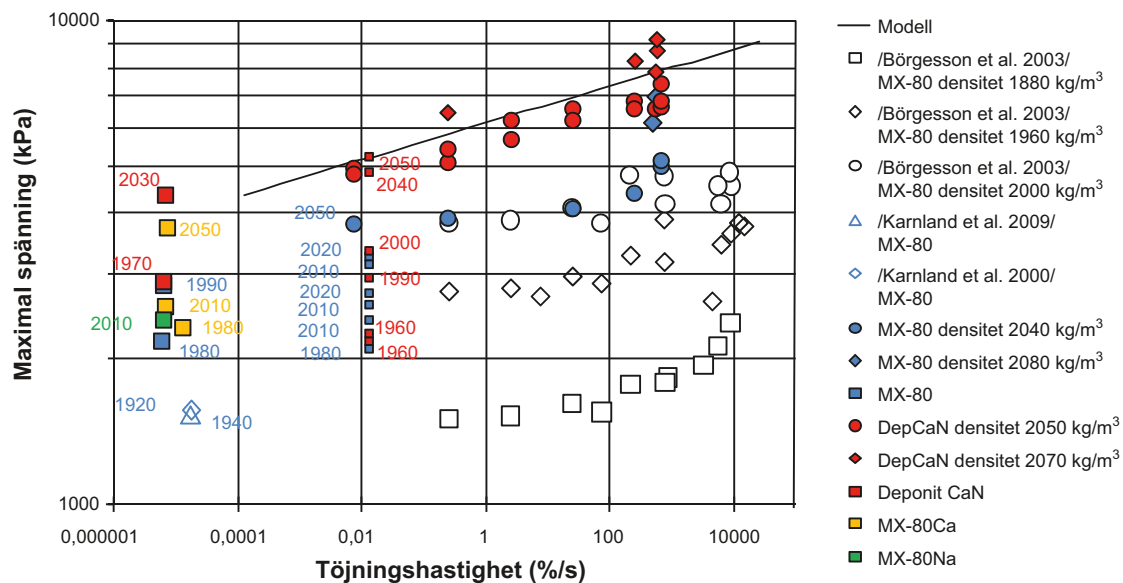
Modellering av bentonituträngning i KBS-3H har gjorts /24-27/, men det storskaliga försöket i BB har ännu inte genomförts eftersom utrustningen använts till andra försök.

Modellering av homogeniseringen i Återtagsförsöket pågår främst inom TF EBS. Homogeniseringen av bentonitringarna, pelletsspalten och spalten mellan kapsel och ring har studerats inom projektet SR-Site bland annat för olika pelletsspaltjocklek /24-14/. Se även avsnitt 24.2.11.

Mycket arbete har gjorts med kapselskjuvning. Dels har nya materialmodeller för snabb skjuvning tagits fram för både MX-80 och MX-80Ca. Triaxialförsök och enaxliga tryckförsök har på MX-80Ca och Deponit CaN vid olika densiteter och skjuvhastigheter. Figur 24-9 visar en sammanställning av mätta maximala spänningar som funktion av töjningshastigheten och det samband som används i SR-Site för beräkningarna av bergskjuvfallet. I den nya modellen är hastighetsberoendet mindre än den som användes för SR-Can.



Figur 24-8. Sammanställning av svälltrycksmätningar på Ca-bentoniter.



Figur 24-9. Sammanställning av brottspänningarna mätta som funktion av töjningshastigheten på Ca-bentoniter och sambandet som används inom SR-Site.

Beräkningstekniken har också förbättrats genom att hastighetsberoendet hos bentonitens hållfasthet lagts in som en hållfasthet som bestäms individuellt för varje element i bufferten och som är en funktion av töjningshastigheten (s^{-1}) i stället för skjuvningshastigheten (m/s). (Tidigare har bentonitens hållfasthet beaktats genom en konstant hållfasthet som motsvarar den totala skjuvningshastigheten.) Den nya materialmodellen och den nya beräkningstekniken har gjort att kapselpåverkan från en bergskjuvning har sjunkit och kommer enligt beräkningarna inte att ge kritiska spänningar i kapseln. Detta arbete kommer att sl rapporteras inom ramen för SR-Site.

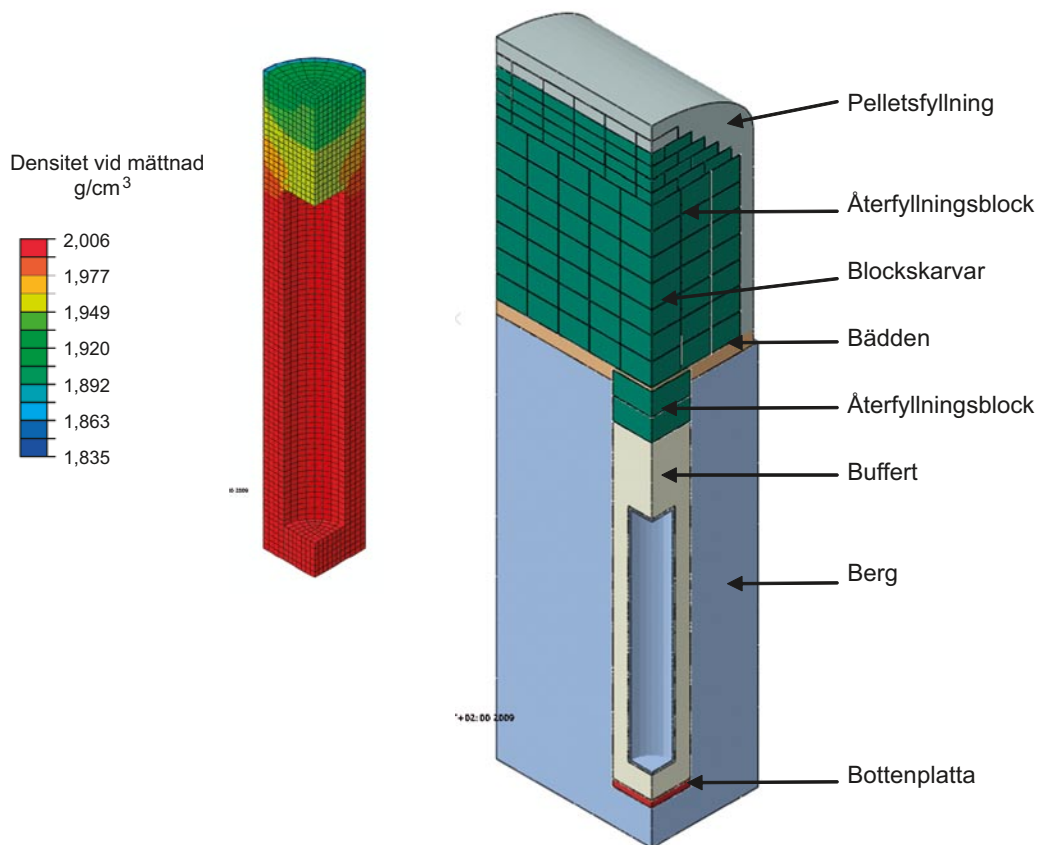
Motsvarande beräkningar för KBS-3H visar att inverkan av den perforerade supercontainern på töjningarna i kapseln efter en bergskjuvning är obetydliga och att resultaten av beräkningarna för KBS-3V även kan användas för KBS-3H.

Studier av vilka THM-processer som kan ge ökad sprödhet och ökad hållfasthet i bufferten har gjorts /24-28/.

De fortsatta studierna av inverkan av höga vattentryck på svälltryck och hållfasthet visar att en eventuell ökning av svälltrycket orsakat av ett högt vattentryck (vid glaciala förhållanden) inte tycks öka skjuvhållfastheten, vilket stöder ett gammalt antagande att det är portalet som styr hållfastheten snarare än svälltrycket.

Modellering av buffertuppsvällning mot återfylld tunnel har också gjorts /24-14, 24-29/. Resultaten visar att uppsvällningen är störst om tunneln är torr. Vid buffertdensiteten $2\ 000\ kg/m^3$ blir uppåtsvällningen maximalt cirka tio centimeter och den kritiska buffertdensiteten på kapseln ovasida $1\ 960\ kg/m^3$. Figur 24-10 visar den vertikala svällningen för detta fall. Om buffertdensiteten endast är $1\ 950\ kg/m^3$ blir uppåtsvällningen cirka sju centimeter och buffertdensiteten ovan kapseln som lägst $1\ 920\ kg/m^3$. Dessa beräkningar har gjorts med antagande att bufferten är vattenmättad och homogeniserad samt har tillgång till vatten för att svälla, medan återfyllningen består av block och pellets utan tillgång till vatten. Kompletterande beräkningar med de nya materialmodellerna för omättad buffert som även tar hänsyn till bevättnings- och homogeniseringsförloppen är önskvärda (se avsnitt 24.2.11).

Återfyllningsmaterialen Friedlandlera, Asha 230 och IBECO RWC-BF har undersökts i laboratorieförsök med avseende på svällning, homogenisering, självläkning och kompression /24-15, 24-19/. Figur 24-11 visar en sammanställning av resultat från svälltrycksmätningar på dessa material. Spaltvidd, vattenkvalitet och pelletsfyllning har varierats i försöken. Resultaten kommer att användas i modellering och utvärdering av återfyllningens homogenisering. Kompressionsegenskaperna hos vattenmättade återfyllningsmaterial har mätts med ödometerförsök.



Figur 24-10. FEM-modell av oöversikt återfyllning och exempel på resultat av uppåtsvällningen vid referensfallet /24-14/.

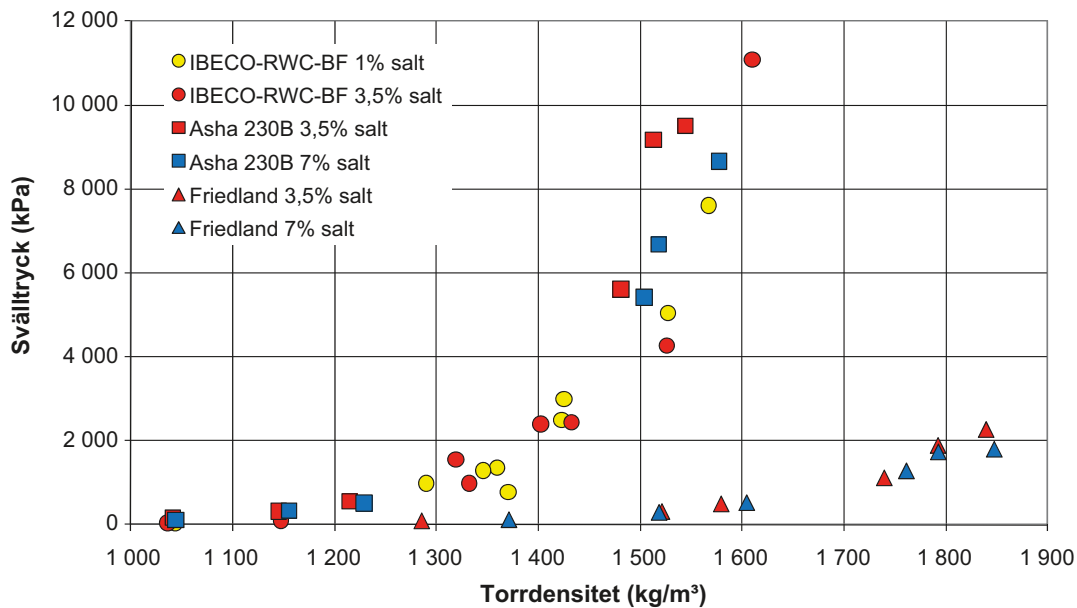
Självläkningsförmågan hos olika återfyllnadsmaterial efter att kanalbildning och erosion uppstått har undersökts i ett antal försök. I försöken uppmättes den hydrauliska konduktiviteten före och efter borring av ett smalt hål i det vattenmättade materialet. En sammanställning av mätningarna visar att Asha och IBECO RWC-BF homogeniserar bra för torrdensiteter över cirka $1\,400\text{ kg/m}^3$, medan Friedlandlera behöver en torrdensitet över $1\,700\text{ kg/m}^3$ för att homogenisera /24-15, 24-19/. Pelletsfyllningar ger dålig homogenisering på grund av den låga densiteten och 30/70 blandning av bergkross och bentonit ger också otillfredsställande homogenisering, trots mycket hög torrdensitet. Pelletsfyllningen behöver hjälp från bentonitblocken för att homogenisera.

Inom projektet SR-Site har modellering av homogeniseringen av systemet block och pellets i deponeringstunnlarna gjorts. Olika bergutfall har studerats. Resultaten visar bland annat att man för ytterlighetsfallet av maximalt bergutfall får en kvarstående inhomogenitet i pelletsspalten som ger en minsta torrdensitet i spalten av strax under $1\,400\text{ kg/m}^3$. Dock har i brist på materialdata MX-80 använts som räkneexempel.

Program

Homogeniseringen och självläkningen är viktiga processer av betydelse för förvarets funktion och mycket av det pågående arbetet kommer att fortsätta.

Laboratorieförsöken med olika typ av svällning ska fortsätta och en del av dessa kommer att användas som beräkningsfall för TF EBS. Dessa används för att kontrollera, kalibrera och eventuellt uppdatera materialmodellen. Tekniken för att modellera denna svällning med FEM kommer också att utvecklas både för Abaqus och Code Bright. Insatser krävs för att hantera den stora utsvällning som kan förekomma, vilken ofta medför alltför deformerade element. Förutom de enkla försöken med axiell eller radiell svällning kommer även mer komplicerade geometrier som kan motsvara bort-eroderade partier i deponeringshål att simuleras i laboratorium i skala 1:10 och modelleras med FEM.



Figur 24-11. Samband mellan svälltryck och torrdensitet för undersökta återfyllningsmaterial /24-15, 24-19/.

En viktig faktor som hjälper till att begränsa uppsvällningen av bufferten och bentonituträngning i sprickor är friktionen mellan bentonit och bergvägg och mellan bentonit och kapsel. Denna friktion kommer att studeras med skjuvförsök mellan bentonit och olika material.

Modellering av densitetsfördelningen efter olika typer av bentonitförluster kommer sedan att genomföras med de nya uppdaterade modellerna och förbättrade beräkningsteknikerna. Ett försök i full skala för att kontrollera en eller flera kritiska bentonitförluster övervägs.

Försöket BB (Big Bertha), där utsvällning genom den perforerade behållaren med hål och spalt i full skala, planeras att genomföras under kommande år. Efter full utsvällning ska densitetsfördelningen bestämmas och jämföras med modelleringsresultat.

Studierna angående vilka processer som kan orsaka förhöjd hållfasthet och ökad sprödhet kommer att fortsätta. De kommer att drivas i ett EU-projekt benämnt Pebs. I detta projekt kommer förutom en litteraturinventering ett stort antal laborieförsök och framför allt enaxliga tryckförsök göras. Andra försök som kan bli aktuella är triaxialförsök och bestämning av vattenhållningskurvor.

Preliminärt kommer dessa enaxliga tryckförsök att vara inriktade på effekter av följande:

- fältexponerat material från andra projekt än Lot och då även andra material än MX-80,
- förhöjd temperatur i laboriet vid olika vattenmättnadsgrader,
- cykler med förhöjd temperatur,
- kompakteringsriktning, anisotropi och portryck under provprepareringen,
- materialets struktur vid prepareringen som till exempel pellets, pulver, malning, förekomst av småsprickor eller brottanvisningar.

Fortsatta mätningar av svällnings-, homogeniserings-, självläknings- och kompressionsegenskaperna planeras för de olika återfyllningsmaterialen.

Liknade laborieförsök och parameterutvärderingar som gjorts för bufferten behöver göras för återfyllningen för att uppdatera modellerna för återfyllningsmaterial.

Modellering av homogeniseringsförloppet ska också göras med de uppdaterade modellerna. Modellerna kommer också att användas i studierna om hur återfyllningen påverkar pluggen.

Avsikten är att uppdatera hela den mekaniska beskrivningen av silon i SFR. Detta innefattar THM-modellering av vattenmättnadsfasen samt framtagning av svälltrycksdata för GEKO/QI.

24.2.10 Termisk expansion

Denna process ingår i THM-modellen, se nästa avsnitt.

24.2.11 Integrerade studier – THM-utveckling under vattenmättnadsfasen

När buffert och pellets installerats i ett deponeringshåll kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Vattenupptag sker också i återfyllningen efter installation. Vattenupptaget påverkar och påverkas av en rad kopplade termiska, hydrauliska och mekaniska processer. Temperaturskillnader mellan olika delar av bufferten leder 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. Termisk expansion ingår i den kopplade THM-modellen.

Inom SKB:s program pågår såväl omfattande experimentellt som modellutvecklingsarbete inom integrerad THM-utveckling. Den osäkraste delen av den kopplade modellen för omättad bentonit är den mekaniska delmodellen. Mekaniska delmodeller ingår både i Abaqus och Code Bright.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 avsåg SKB genomföra ett omfattande arbete med dessa integrerade studier. FEM-koderna Abaqus och Code Bright skulle vidareutvecklas och ett bättre parameterutvärderas. SKB menade också att det fanns behov av att vidareutveckla Code Bright, dels beträffande kodens urval av mekaniska och hydrodynamiska konstitutiva samband, dels beträffande kodens urval av elementtyper.

Inom det internationella projektet TF EBS (Äspö Task Force on Engineered Barrier Systems) planerades modellering och jämförelser med mätdata av först de båda fältförsöken i URL och sedan Återtagningsförsöket i Äspölaboratoriet. Fältstudierna av Prototypförvaret och TBT skulle fortsätta medan resultaten av Återtagningsförsöket skulle användas för att utvärdera modellerna. Vi avsåg också att överväga nya fältförsök av både KBS-3H och KBS-3V.

Arbete inom projektet Baclo planerades för fokusering på kanalbildning och erosion under återfyllningsoperationen. Även undersökning av processen för läkning av eventuella kanaler samt vattenmättnad och homogenisering av återfyllnaden planerades.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

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.

Modellstudier

Den omättade buffertens och återfyllnadens homogeniseringsprocess undersöktes inte i SR-Can. Ett stort steg har tagits vad gäller parameterbestämning för den mekaniska modellen i Code Bright. Detta har också inbegripit modifieringar av de konstitutiva lagarna, till exempel har den ”elastiska” svällningsmodulen kopplats till en portalsberoende svälltryckskurva. Denna modifiering har implementerats i källkoden till Code Bright och har visat sig vara relevant. Dessutom har hystereseffekterna vid svällning/kompression-cykler beaktats och dessa har visat sig bidra till en kvarstående heterogenitet under homogeniseringsprocessen.

I undersökningen av bufferthomogeniseringen i SR-Site /24-14/ användes en analytisk modell för att studera vad som styr homogeniseringen i bufferten. Denna undersökning visar att bevättnings-

sekvensen av och skillnaden i totaltryck i blocket och i pelletsspalten har en betydande effekt på den slutliga skillnaden i medelportal tillhörande block eller pelletsspalt.

Responser hos FE-modeller (utvecklade för Code Bright-lösaren) jämförs med sensordata från Återtagningsförsöket för att undersöka om olika parameteruppsättningar är lämpliga. Här undersöks också effekten av olika pelletsspaltvidder (det vill säga olika deponeringshålsdiametrar) och olika bevättningssekvenser.

Med FE-programmet Abaqus, i vilken den mekaniska modellen har förfinats, har beräkningar gjorts för att modellera homogeniseringsprocessen i ett deponeringshål under vattenmättnadsfasen med en 3D-modell (egentligen rotationssymmetrisk 2D-modell) för att studera den kopplade THM-utvecklingen i hela bufferten tills full vattenmättnad uppnåtts /24-14/. Geometrier och blockdensiteter etc som motsvarar de som används i Återtagningsförsöket och Prototypförvaret har antagits. Resultaten visar att slutdensiteterna lokalt kommer att variera mellan 1 990 kg/m³ och 2 050 kg/m³ obeaktat konsekvenserna av uppåtsvällning.

I TF EBS har THM-modellering av dels de båda kanadensiska fältförsöken ITT och BCE, dels av Äspö försöket CRT gjorts. Modelleringen av CRT visar att avsevärda förbättringar av kopplade THM-modelleringar har uppnåtts med de uppdaterade materialmodellerna för Abaqus och Code Bright, särskilt för den mekaniska modellen, fast det fortfarande återstår en del osäkerheter.

Aktiviteten av modellering av TBT och Prototypförvaret har varit låg på grund av omprioriteringar men kommer att aktiveras i samband med brytningen av dessa försök.

Laboratorieförsök

För att få indata till THM-modellerna har några serier ödomenterförsök och suction-försök gjorts på omättad bentonit. Dessutom pågår en serie med temperaturgradientförsök.

Risken för att bentonitblocken spricker under installationsfasen och konsekvenserna av detta har undersökts i ett antal försöksserier. Resultaten visar att blocken spricker dels under höga temperaturgradienter, dels när vatten börjat tränga in i pelletsspalten i KBS-3V och dels när blocken i KBS-3H utsätts för hög relativ humiditet /24-24/. Konsekvenserna av uppsprickning av blocken kan vara allvarlig och begränsar tiden som blocken kan exponeras innan återfyllningen placerats och begränsar acceptabelt inflöde i deponeringshålen.

Fältstudier

Resultaten från mätningar av temperatur, fuktinnehåll och tryck samt resultaten från brytningen har använts för att jämföra med modelleringsresultaten. Överensstämmelsen är god fast frågetecken kvarstår, främst vad gäller totaltryckens utveckling /24-14/.

Uppföljning och mätningarna i TBT och Prototypförvaret har fortsatt och gett data som kommer att användas vid modelleringar då dessa försök bryts.

Återfyllning

De egenskaper som har betydelse återfyllnadens utveckling under och efter installation är främst hydrauliska och mekaniska egenskaper hos vattenomättade material. De hydrauliska egenskaperna hanteras i avsnitt 24.2.5 och piping/erosion i avsnitt 24.2.8 och de mekaniska egenskaperna hos det omättade återfyllningssystemet av pellets och bentonitblock behandlas här.

För att kunna beräkna mekanisk samverkan mellan buffert och omättad återfyllnad har ett antal mekaniska parametrar hos bentonitblocken och pelletsfyllnaden bestämts för Friedlandera, Asha 230 och IBECO RWC-BF både på block och pelletsfyllningar /24-16, 24-15/. Dessutom har inverkan av olika relativ humiditet kontakt med block av dessa material undersökts i ett flertal laboratorieserier.

Homogeniseringen av återfyllningsblock och pelletsfyllning under bevätning analyserades för SR-Site med hjälp av flera axisymmetriska modeller /24-14/. Modellerna visar att återfyllnadsmaterialet inte kommer att homogeniseras fullt ut. Den återstående skillnaden är av sådan omfattning att

skillnaden mellan de inre och yttre delarna är något mer än 0,2 i portal och att anledningen till detta är friktion i återfyllningsmaterialet och hystereseffekter under svällnings/kompressionscyklerna.

Program

De kommande årens arbete kommer att domineras av brytningen av TBT och den yttre sektionen av Prototypförvaret. Dessutom föreslås att antal laboratorieförsök som ska vara underlag för förbättringar.

Modellstudier

Modellering av Återtagsförsöket, TBT och Prototypförvaret kommer att vara prioriterade modellstudier de kommande åren. Både Code-Bright och Abaqus kommer att användas.

Återtagsförsöket modelleras både som en uppgift i TF EBS och inför slutrapporteringen av försöket, som kommer att ske under år 2010. En utvärdering av resultaten förväntas ge värdefull information om både materialmodellernas tillförlitlighet och beräkningsverktygens kapacitet.

TBT bryts under år 2010 och skiljer sig från Återtagsförsöket främst genom att mycket höga temperaturer förekommit och dels genom interaktionen med sandskölden och sandfiltret. Modellering av detta försök och jämförelser med mätresultat, både från mätgivare och från fysiska bestämningar efter brytning, kommer att genomföras.

För Prototypförvaret planeras brytning av yttre sektionen under år 2011. Detta försök skiljer sig från Återtagsförsöket och TBT genom att bevätningen av bufferten skett på naturlig väg via berget och genom mekanisk interaktion med återfyllningen. Modellering av Prototypförvaret kommer delvis att ske genom att ett av deponeringshålarna har föreslagits som uppgift i TF EBS.

En annan uppgift i TF EBS är att göra en känslighetsanalys av enkla THM-modelleringsfall för att identifiera de viktigaste processerna och parametrarna och hur de påverkar resultaten.

För att öka kunskapsläget beträffande homogenisering planeras detaljstudier av den hydromekaniska processen i buffert och pelletsfyllda spalter. Kunskaperna från dessa undersökningar kommer att användas till att kalibrera och utveckla modeller.

Nya samband i den mekaniska materialmodellen har nyligen framgångsrikt formulerats och implementerats i Code Bright. Dessa nya egenskaper har ökat allmängiltigheten av och robustheten hos det numeriska verktyget. Vidareutveckling avseende liknande modifieringar planeras.

Såväl experimentella data som termodynamiska samband tyder på en stark koppling mellan vattenhållningsegenskaperna och de mekaniska processerna hos buffertmaterialen. Denna aspekt tycks vara en av de styrande mekanismerna och bör därför implementeras i Code Bright.

Det finns processer som inte kan beskrivas korrekt av den mekaniska materialmodell som nu används. För att förbättra modellens generalitet kommer ytterligare teoretisk utveckling ske. Mer generella versioner av modellen ska sedan implementeras i THM-koden (Code Bright).

Arbetet som rör utvecklingen av materialmodeller bör sträva efter att utveckla samband som:

- efterliknar materialens uppmätta beteende,
- har en god grund i de mekanismer som styr,
- har parametrar som har ett starkt samband med ”väldefinierad” materialkaraktäristik,
- är allmängiltiga,
- är numeriskt stabila,
- är ”enkla” att använda.

Laboratorieförsök

Laboratorieförsöken för att förbättra materialmodellerna kommer att fortsätta med bland annat temperaturgradientförsök. Den mekaniska modellen vidareutvecklas med laboratorieförsök med undersökning av följande effekter:

- volymändring (odränerade ödometerförsök med konstant vattenkvot),
- hysteres (inverkan av initiell vattenkvot och temperatur under konstant volym),
- anisotropi (inverkan av kompakteringsriktningen på svälltryck och eventuellt på hållfasthet),
- vattenupptagning (RH-mätning och bestämning av gradienter i vattenkvot och densitet).

Fältstudier

Uppföljning och brytning av TBT och Prototypförvarets två yttre deponeringshål.

Återfyllning

Laboratorieförsöken och modellberäkningarna ska uppdateras för nya återfyllningskandidater. En kritisk parameter vid uppsvällningberäkningarna är storleken och de mekaniska egenskaperna hos de horisontella skarvarna mellan återfyllningsblocken. Om möjligt ska försök göras för att bättre kunna modellera dessa.

Den kopplade THM-utvecklingen såsom beskriven ovan ska studeras i ett övergripande projekt om vattenmättnad, självläkning och homogenisering. Se även kapitel 13.

Målet med projektet är att genom analys av experimentella data klargöra att vi har tillräcklig förståelse av processerna piping, erosion, vattenmättnad, självläkning och homogenisering för buffert och återfyllning. Denna förståelse krävs för att bestämma utvecklingen av densitet och svälltryck för det samverkande systemet buffert, återfyllning och plugg för tiden mellan installation och förvarets förslutning samt för tiden efter förslutning. När denna utveckling är färdig kan konstruktionsförutsättningarna för dessa systemdelar uppdateras. Dessutom bidrar detta till den långsiktiga processförståelsen.

I detalj innebär dessa studier att beskriva vattenmättnadsförloppet hos det samverkande systemet buffert, återfyllning, plugg och berg enligt nedstående punkter:

- utreda olika scenarier för vattenmättnad av återfyllningen som funktion av pluggens täthet,
- undersöka möjlig omfattning av omfördelning av material,
- ta fram underlag till mer praktiskt tillämpbara konstruktionsförutsättningar genom att utvärdera kraven på inflöde till deponeringshål och deponeringstunnlar samt kombinationen av dessa.

Det krävs också en utveckling av modelleringen av den deformation som uppstår i återfyllningen på grund av uppåtriktad svällning av bufferten.

Den långsiktiga konceptuella och numeriska modellen för hela systemet buffert, återfyllning, plugg och berg kräver fortsatta studier enligt följande:

- Ta fram täthetskrav samt krav på hur mycket vatten som får släppas förbi pluggen under bygge och härdning, baserat på scenarier av olika fall av piping, erosion, vattenmättnad och homogenisering och baserat på laboratorietester och analyser optimera täthetskraven på pluggen.
- Ta fram konstruktionsförutsättningar för pluggen i form av ojämnt fördelad last under vattenmättnad av återfyllning och bentonitdelen av pluggen.
- Utvärdera möjligheten och effekter av att vattenmätta återfyllningen genom pluggen.

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 kan dominera transporten vid låg densitet på bufferten som följd av till exempel erosion, se avsnitt 24.2.20.

Advektion i återfyllningen behandlas i avsnittet om vattentransport under mättade förhållanden (avsnitt 24.2.6).

24.2.13 Diffusion

Diffusiv transport tenderar att utjämna skillnader i kemisk potential hos de ingående molekylerna eller jonerna, oftast med resultatet att ämnen transporteras från områden med högre koncentration till områden med lägre. I den speciella elektrokemiska miljö som råder i kompakterad bentonit kan det emellertid vara så att koncentrationsskillnader kvarstår även när jämvikt är uppnådd. Detta gäller speciellt för joner.

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.

Den diffusiva transportkapaciteten beskrivs vanligtvis med diffusionskoefficienter som är unika för varje typ av molekyl eller jon och beror också i princip på alla närvarande molekyler och joner. Typiskt är diffusionskoefficienterna i bufferten reducerade med en faktor 50 eller mer i förhållande till rent vatten. Se även avsnitt 24.2.25.

Diffusion i återfyllningen och diffusion i väggbufferten i SFR kan hanteras på samma sätt som diffusion i bufferten.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI ansåg att fler kemiska och fysikaliska egenskaper, utöver täthet och svälltryck, hos bufferten behöver specificeras. Kärnavfallsrådet uppmanar SKB att upprätta transportmodeller genom bentoniten för de viktigaste radionukliderna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Den materialmodell för bentonit som även används för att beräkna svälltryckets beroende av temperatur (avsnitt 24.2.4) och saltkoncentrationer (avsnitt 24.2.14) har applicerats på jondiffusion och resulterat i ett enkelt matematisk ramverk som beskriver diffusion för både negativt och positivt laddade joner samt för neutrala specier. Ramverket innebär en förenklad hantering av diffusion i bentonit och ger en förklaring till uppmätta effektiva jondiffusionskoefficienters beroende på bakgrundskoncentration /24-30/.

Vissa koncept i detta ramverk har utnyttjats i diffusionsdelen av kvantifieringen av massförlust på grund av kolloidbildning /24-31/.

Diffusiv uttransport av sulfat har studerats i renad montmorillonit med geometriskt välbestämd gips-källa samt i genomdiffusionsförsök med mättad gipslösning /24-32/. Resultaten visar att samma jonjämvikt råder mellan mineral och lera som mellan lösning och lera. Vidare påvisades en betydligt högre koncentrationsgradient i fallet med gipsupplösning i natriumdominerad montmorillonit än i ren kalciummontmorillonit. Detta indikerar att lösligheten för gips beror på natrium/kalcium-förhållandet i montmorilloniten. Resultaten visar också att de kemiska principer som styr i denna typ av försök är desamma som i motsvarande tracerdiffusionsförsök och indikerar att den ovan beskrivna materialmodellen och tolkningen är korrekt. Detta har implikationer på hur bentonit bör modelleras geokemiskt, men även mekaniskt.

Program

Inom projektet Lot-modellering genomförs laborieförsök för att mäta diffusion i ren kalcium- och natrium-montmorillonit av klorid- och sulfatlösningar med huvudsyfte att utveckla materialmodellen för bentonit.

Mätningar av diffusionshastigheter i montmorillonit på kort tidsskala (nanosekunder) med neutronspredningsexperiment visar att denna diffusion är mycket lik den som uppmäts i rent vatten också för så låga vattenkvoter som råder i bufferten. Samtidigt har diffusionskoefficienter mätta i bentonit på längre tidsskalor, relevanta för laboratorie- och fältförsök, betydligt lägre värden än de i rent vatten. För att sammankoppla diffusion i bentonit på olika tidsskalor utförs molekylärdynamiska simuleringar av diffusion i montmorillonit på kort tidsskala (ns) samt arbete med analytiska modeller inom TF EBS. Dessa insatser kommer att fortsätta under den kommande perioden.

Fortsatta teoretiska och laborativa studier kommer att genomföras med syfte att öka den grundläggande förståelsen för transportegenskaper i bentonit. Utvärdering och vidareutveckling av befintliga reaktiva transportkoder med avseende på bentonitspecifika egenskaper kommer att genomföras.

24.2.14 Osmos

Buffertens tätande egenskaper, huvudsakligen högt svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, är intimt kopplade till bentonitens affinitet för vatten. För ett givet bentonitmaterial avtar affiniteten med ökande mängd upptaget vatten. Sambandet kan mätas och brukar beskrivas med en så kallad vattenhållningskurva, se även avsnitt 24.2.5. Även andra komponenter i ett förvarssystem har affinitet för vatten i olika grad varvid konkurrens om vattnet uppstår. Bentonitens svälltryck påverkas därigenom analogt med en osmotisk tryckförändring i en saltlösning. Osmosprocessen är därför intimt sammanlänkad med diffusion, se avsnitt 24.2.13.

I högkompakterad bentonit har de laddade enskilda montmorillonitflaken 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. En ökning av grundvattnets jonkoncentration leder till en ny osmotisk jämvikt, vilket innebär en reduktion av bentonitens svälltryck. Tryckförändringarna kan beräknas eftersom aktiviteten hos motjoner och joner i grundvattnet kan bestämmas. En liknande svälltryckssänkning uppstår då grundvattnen fryser, se avsnitt 24.2.4.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2007 uttryckte SKI en önskan att SKB motiverar kriteriet för maximal salthalt i bufferten.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Uppmätta svälltryckseffekter på grund av frysning har visats vara helt analoga med svälltryckseffekter på grund av salt, se avsnitt 24.2.4.

Program

SKB anser att processen är väl belyst med avseende på natriumdominerade system och att vidare insatser inte är motiverade.

För kalciumdominerade system är vissa ytterligare insatser planerade, eftersom beräkningsmetoden anses underskatta motjons-koncentrationen vid mineralytorna för tvåvärda joner, vilket i sin tur leder till en överskattning av trycksänkningen i kalciumfallet. SKB anser att det är väsentligt att säkerställa en riktig konceptuell bild och avser därför att fortsätta med mer avancerade modelleringsverktyg och applicera förbättrade teorier (inkludering av korrelationseffekter) för att beskriva kalciumdominerade system.

InomTF EBS planeras fortsatta molekylärdynamiska simuleringar av jonfördelningar i porvattnet samt av hur koncentrationsskillnader med en extern lösning upprätthålls i jämvikt. Dessa resultat jämförs med grundläggande termodynamik och analytiska kontinuummodeller, där dessa är applicerbara (Poisson-Boltzmann-ekvationen).

För materialet i silon i SFR kan det vara av värde att göra ytterligare studier av de hydraulisk konduktivitet och svälltryck som funktion av salthalt.

24.2.15 Jonbyte/sorption

I montmorillonit upprätthålls elektrisk laddningsneutralitet genom att positivt laddade motjoner i porvattnet kompenserar de negativt laddade mineralflaken. Under saltfria förhållanden kommer därför motjonerna att vara ackumulerade kring montmorilloniten trots att de är diffusiva. I kontakt med en saltlösning kommer emellertid ett laddningsbevarande diffusivt utbyte att ske mellan joner associerade med montmorilloniten och positivt laddade joner i den yttre lösningen till dess att jämvikt råder. Omfördelning av motjoner på detta sätt kallas jonbyte. Den totala jonbyteskapaciteten bestäms rutinmässigt laborativt genom att fullständigt jonbyta leran till en specifik jon.

I en buffert kommer motjonsuppsättningen att variera med tiden och beror på grundvattenkemin och bentonitens uppsättning av accessoriska mineral. Olika motjonsuppsättningar leder till olika fysikaliska egenskaper hos bentoniten.

Utöver jonbytesprocessen har bentonit också förmågan att sorbera vissa joner genom ytkomplexbildning på de ingående mineralen, speciellt på montmorillonitflakens kanter. Joner bundna till leran på detta vis är fixerade och därmed inte diffusiva. Ytkomplexbildningen är starkt pH-beroende, med mer omfattande fixering vid högre pH-värden.

Sorption i återfyllningen och i väggbufferten i SFR kan hanteras på samma sätt som sorption i bufferten.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2007 uttryckte SKI att SKB bör ge större uppmärksamhet till cementeringsprocesser, kopplingen mellan jonbytesprocesser, omvandlingar av smektit samt risken för strukturell sönderdelning av leran. Dessutom ansåg SKI att kalciumbentonitens svällningsegenskaper behöver karaktäriseras mer, samt att kopparjoners inverkan på bufferten borde studeras.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Jonbytesjämvikten mellan kalcium och natrium har studerats i ren montmorillonit som funktion av densitet /24-12/. Inga större skillnader noterades för selektivitetskoefficienten. Vidare demonstrerades hur svälltrycken sjunker med ökande kalciumfraktion för lägre densiteter samt hur svälltrycksförändringen som funktion av kalcium/natrium-förhållandet är termodynamiskt reversibel.

En sammanställning av experimentellt uppmätta jämviktskonstanter för jonbyte- och sorptionsreaktioner med Fe(II) har publicerats /24-33/.

Laborariestudier av montmorillonitgeler har visat att förmågan hos montmorillonit att bilda gel drastiskt försämras i pyrofosfatlösningar /24-12/. Detta tolkas som att gelbildningsförmågan beror på mängden positiv laddning på montmorillonitflakens kanter, vilken elimineras genom sorption av negativt laddade pyrofosfatjoner. Resultaten har stor betydelse för förståelsen av hur kollider bildas, se avsnitt 24.2.20.

Program

I programmet ingår mätningar av svälltryck och hydraulisk konduktivitet i Cu(II)-jonbytt montmorillonit.

Jonbytes- och diffusionsprocesserna är starkt sammankopplade och ett gemensamt forskningsprogram finns beskrivet i avsnitt 24.2.13.

24.2.16 Montmorillonitomvandling

De önskvärda fysikaliska egenskaperna hos bufferten, främst svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, beror på montmorillonitens affinitet för vatten. I ett mineral med en flakladdning nära noll, till exempel i pyrofyllit, är affiniteten för vatten obetydlig vilket ger radikalt andra egenskaper än hos montmorillonit. En mindre ökning av montmorillonitens flakladdning och därmed fler balanserande katjoner leder till större affinitet för vatten. Ökar emellertid laddningen tillräckligt mycket kommer jonerna att fixeras till mineralflaken med en minskad affinitet för vatten som följd. Slutprodukten i en sådan process är glimmermineral, för vilka affiniteten för vatten också är obetydlig. De typiska egenskaperna hos montmorilloniten är således en följd av en medelhög flakladdning.

Kaliumjoner fixeras vid lägre flakladdning än natriumjoner, vilka i sin tur fixeras vid lägre laddning än kalciumjoner. Mineralet illit har en flakladdning mellan den hos montmorillonit och glimmer. Kaliumjoner fixeras till viss del i en illitlera, men 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.

Vid en eventuell omvandling kan sekundära processer ha betydelse för buffertens funktion. Frigörelse av kisel skulle sannolikt leda till utfällningar av olika kiselmineral (se avsnitt 24.2.18), vilka kan påverka buffertens reologiska egenskaper.

I SFR kommer den vattenmättade bentoniten att vara i direkt kontakt med betong och pH i vattnet kan därför bli mycket högt. Det råder stor osäkerhet om hur bentonit reagerar på högt pH. De förväntade reaktionerna beskrivs nedan.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2007 påpekar SKI att:

- SKB bör bättre motivera temperaturkriteriet för bufferten och mera ingående utreda risken för uttorkning och att följderna av att bufferten förblir omättad under lång tid behöver studeras även fortsättningsvis.
- SKB bör före ansökan redovisa så mycket som möjligt av demonstrationsförsöken på Äspö. SKI anser att SKB har en bra uppsättning in situ-försök och det är viktigt att dessa fullföljs och att resultat används för att stödja ansökan. SKB bör dock beakta risker för att långtidsförsök misslyckas, utveckla modeller för tolkning, beakta beslutstidpunkter med mera.
- SKB bör bättre uppmärksamma cementeringsprocesser, kopplingen mellan jonbytesprocesser, omvandlingar av smektit samt risken för strukturell sönderdelning av leran. SKI utgår från att prover som visar cementering beaktas i säkerhetsanalysen.
- SKB behöver studera vilken inverkan kopparjoner har på bufferten.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Bentonit från försökspaket A2 i Lotserien vid Äspölaboratoriet har studerats ytterligare /24-34/. Detta försökspaket har varit utsatt för accelererade förhållanden (maxtemperatur 130 °C). En liten men signifikant ökning av jonbyteskapaciteten i de varmaste delarna har verifierats av två oberoende laboratorier, se figur 24-12. Denna ökning i jonbyteskapacitet är korrelerad med en ökning av magnesiumjoner i leran. Även mindre reologiska förändringar har uppmätts i de varma delarna (cementering). Studier rörande KBS-3H har även inkluderat hur olika metaller (järn, titan, koppar) påverkar bufferten (se avsnitt 16.1.1 samt 24.2.18).

Höga pH (cirka 13) har negativ påverkan på montmorillonitens stabilitet. Vatten med pH i intervallet 10–11 reagerar dock mycket långsamt med montmorillonit. En av funktionsindikatorerna för bufferten är därför att pH i grundvattnet ska vara lägre än 11. Eftersom reaktionshastigheten mellan vatten och bentonit vid pH 11 är så långsam, är det svårt att studera processen i laborieförsök.

Fokus i forskningsprogrammet är därför naturliga system och fältförsök. SKB deltar tillsammans med Posiva (Finland) och NDA (Storbritannien) i ett projekt för att studera långtidsreaktioner mellan naturlig bentonit och hyperalkaliska vatten från Troodos-ofioliten på Cypern. pH-värdena i detta grundvatten ligger i intervallet 10,0–11,9, vilket också är typiskt för så kallad låg-pH-cement. Den konceptuella modellen för reaktionsmodellen finns presenterad i figur 24-13. Hittills har projektet fokuserat på att identifiera platser som överensstämmer med den konceptuella modellen.

Interaktioner mellan cement och leror har studerats i EU-projektet ECOCLAY-II /24-35/. Detta projekt visar att upplösning av montmorillonit i alkalisk miljö ökar halten Al, Si, Mg och Na i lösning. Dessa element kan fällas ut i form av olika silikater och aluminiumsilikater. Om miljön även är rik på kalium kan det icke-svällande mineralet illit bildas. Vid ytterligare förhöjt pH, nära ytan till betongen, kan illitbildningen följas av utfällning av phillipsit-K (ett aluminiumsilikat).

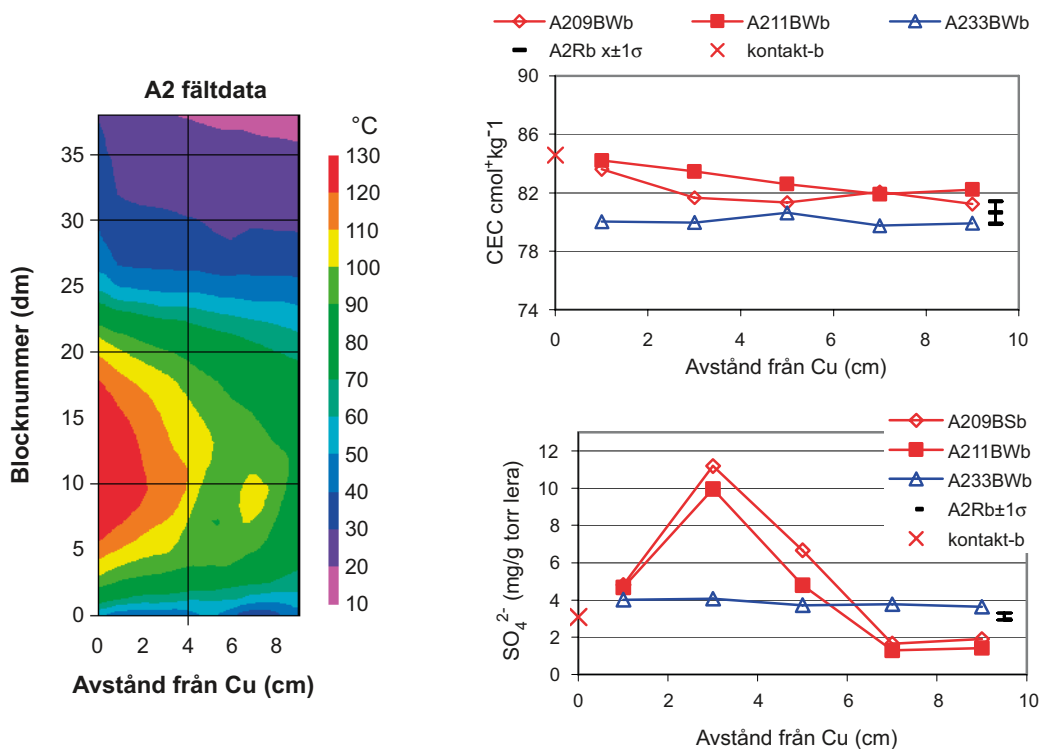
Reaktionerna som förväntas ske i bentoniten då pH ökar (i en kaliumfattig miljö) sammanfattas nedan /24-35/:

Montmorillonit	lermineral av typen smektit som har krympande och svällande egenskaper och hög jonbyteskapacitet
↓	
Beidellit	lermineral av typen smektit
↓	
Saponit och Klinoklor	lermineral av typen smektit bergmineral. Klinoklor är den vanligaste kloriten
↓	
Zeoliter	bergmineral, vattenhaltiga aluminiumsilikater, till exempel analcim, chabasit, mordenit och phillipsit-NaK
↓	
Gismondin och Gyrolit	bergmineral av typen zeolit bergmineral, ett silikat utan aluminium

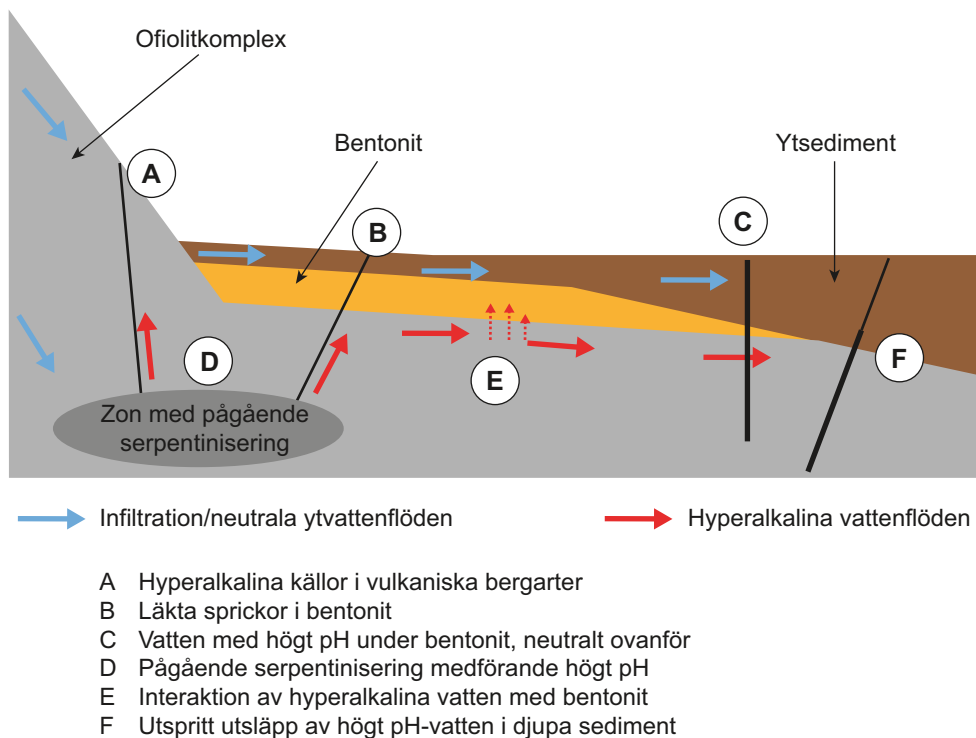
Kemisk växelverkan mellan betongbarriärer och bentonit har studerats för SFR 1. Syftet har varit att uppskatta både tidsskalan för och storleken av potentiella förändringar i barriärernas kemiska sammansättning och därav följande förändringar av barriärernas transportegenskaper /24-35, 24-37/. Den senare studien /24-37/ syftar främst till att se påverkan längre fram i tiden på grund av klimatförändringar, främst permafrost. Beräkningarna har genomförts med kopplade kemi- och transportmodeller (PHAST i /24-35/ och PhreeqC -2.13 i /24-37/). Detta innebär att man kan göra en bedömning av den sammanlagda effekten av de processer som samtidigt sker i systemet. Porositetsförändringar ingår inte i den version av PHAST som används i modelleringarna /24-35/.

De geokemiska beräkningarna visar att en hel del förändringar förväntas i både betong- och bentonitbarriär i siloförvaret under 100 000 år. I figur 24-14 ges en illustration av de förväntade mineralomvandlingarna i silobufferten efter 10 000 år. Montmorilloniten omvandlas successivt vid kontakten med vatten med högt pH, och efter 10 000 år har en tredjedel av den totala mängden montmorillonit i bentoniten lösts upp och kalciumsilikatmineral, zeoliter och nya leror har bildats vid gränsytorerna till betongsilon och sprutbetongen. De nya mineralen har något annorlunda egenskaper än den ursprungliga montmorilloniten, bland annat sämre svällningsegenskaper och högre molvolym /24-35/.

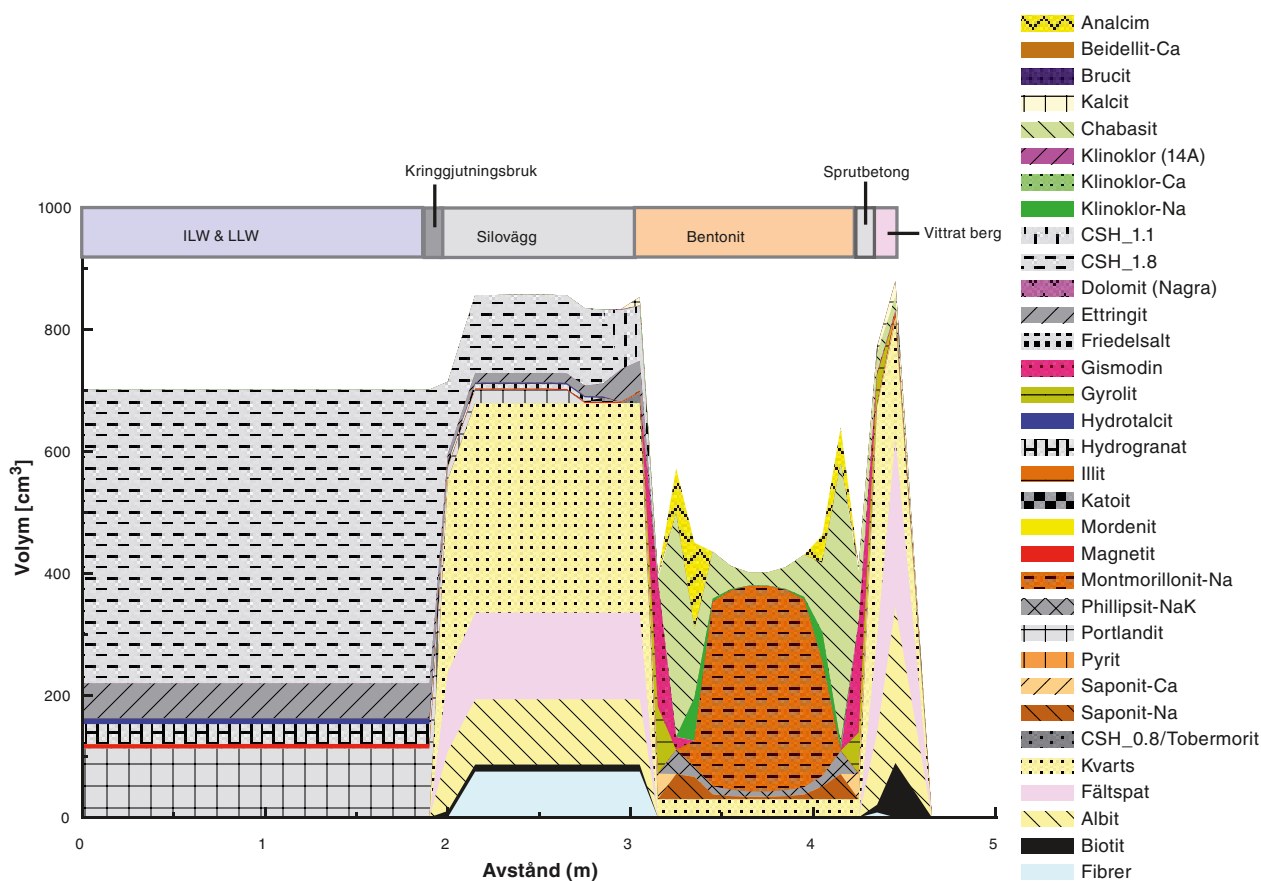
Silica sol är ett potentiellt fintättningsmedel för byggandet av Kärnbränsleförvaret och undersöks bland annat in situ i Äspölaboratoriet. Efter inblandning av tio procent NaCl (5:1 Silica sol:NaCl) pumpas Silica sol in i borrhål och sprickor och gelar vanligtvis inom en timme. Under det normala byggförfarandet ska medlet inte kunna komma i kontakt med bentonit eller andra buffert/deponeringsmaterial. Ett oförutsett läckage av ogelad Silica sol skulle dock kunna påverka bentonitbarriären negativt. Under normala betingelser gelar Silica sol-partiklarna irreversibelt med varandra genom kolloidal aggregering. Vid eventuell kontakt med bentonit finns risk att samma process sker med montmorilloniten.



Figur 24-12. Till vänster: Temperaturfördelningen under operation i försökspaket A2 i Lotserien. Överst till höger: Uppmätt jonbyteskapacitet (CEC) i block utsatta för hög temperatur (A209BWb och A211BWb) och låg temperatur (A233BWb) samt för ett prov i direkt kontakt med värmaren i den varmaste delen (kontakt-b). Diagrammet visar också spridningen på jonbyteskapaciteten hos 5 referensprov (A2Rb). En liten med noterbar förhöjning av jonbyteskapaciteten kan noteras i de varma delarna av försökspaketet. Nederst till vänster: Sulfatinnehållet i samma positioner. En omfördelning har skett i de varma delarna. Från /24-34/.



Figur 24-13. Konceptuell modell av reaktionen mellan hyperalkaliska grundvatten och bentonit på Cypern /24-36/.



Figur 24-14. Mineralogisk sammansättning i systemet avfallsmatrix-kringgjutningsbruk-silovägg-bentonit-sprutbetong-berg efter 10 000 års lakning (simulering med normal por diffusion, vittrat berg och sött grundvatten) /24-35/.

För att på kvalitativ nivå uppskatta Silica sols påverkan på bentonit har undersökningar av medlet samt olika blandningar av Silica sol/bentonit har gjorts med olika metoder, bland annat Photon Correlation Spectroscopy (PCS), Zeta potential mätningar, fri svällning och sedimentationsförsök, Svepelektronmikroskop (SEM) samt atomkraftsmikroskop (AFM).

Den preliminära slutsatsen är att Silica sol kan aggregera främst vid torkning (eller vid låga vattenhalter), samt även vid höga jonstyrkor, varvid större aggregat bildas. För signifikant påverkan på bentonit som bulkmaterial krävs dock jämförbara mängder (i vikt) av Silica sol som mängd bentonit.

Program

Ett samarbete med Nagra har initierats för att utöka kunskaperna om montmorillonitvandling. I detta samarbete har ett laboratoriesprogram tagits fram med huvudsyfte att verifiera existerande modeller och parametervärden för montmorillonitvandling vid så förvarslika förhållanden som möjligt. Resultat från laboratoriestudien kommer att användas i modellering för att studera kopplade processer, till exempel upplösning/transport av kisel i en termisk gradient.

SKB kommer att beakta möjligheterna för omvandling vid torra förhållanden genom en litteraturstudie och eventuellt ett laboratorieprogram.

Ytterligare studier kommer att genomföras på material från bland annat Lotförsöket med syfte att klarlägga orsakerna till de uppmätta reologiska förändringarna. Planering för brytning av Lot styrs av behovet från säkerhetsanalysen SR-Site och fastläggs i samband med utvärderingen av den färdigställda säkerhetsanalysen.

Förhoppningsvis kommer Cypern-projektet att fortsätta med provtagning och analys av bentonit som har varit i kontakt med vatten med högt pH. En förutsättning är dock att en lämplig och relevant plats kan identifieras.

Reaktioner mellan låg-pH-cement och bentonit kommer också att studeras i ett nytt försök i Äspö, se avsnitt 21.2.10. Avsikten är att installera paket i samma skala som ABM, se avsnitt 24.2.17, men med en mittpelare av cement i stället för en värmare. Försöket är en del av SKB:s långsiktiga program i Äspölaboratoriet. Ingen brytning av de paket som innehåller bentonit förutses ske inom den närmaste 10-årsperioden.

Interaktionen mellan betong och cement av olika slag (OPC, sulfatresistent och låg-pH-cement) och bentonit kommer att studeras inom projektet Långtidsbeständighet hos cement, se avsnitt 21.2.10. Kopplade kemi- och transportmodeller av ämnen i silobarriärerna kan komma att utvecklas för annan mjukvara än den som används i dag. I modellerna kommer då den geokemiska utvecklingen av bentoniten att inkluderas.

Mikroskopistudierna angående interaktionen mellan Silica sol och bentonit har lämnat en del obesvarade frågor, vilka kommer att studeras närmare under kommande period. Försök kommer att göras med Ca-montmorillonit eftersom Ca-joner har känd påverkan på Silica sol-aggregering. Dessa undersökningar kan förhoppningsvis ge mer specifika svar om hur kolloider av Silica sol och bentonit aggregerar under olika förhållanden.

24.2.17 Järn-bentonit interaktioner

Metalliskt järn i anaerob miljö korroderar normalt sett mycket långsamt under bildning av järn(II) hydroxid och vätgas, se avsnitt 23.2.6. I en miljö med bentonitlera kan man dock tänka sig att Fe(III) i montmorillonit kan interagera med det metalliska järnet genom bildning av Fe(II). Reduktionen av Fe(III) till Fe(II) i montmorillonit skulle potentiellt påverka mineralets flakladdning och därmed också dess samspel med vatten och dess benägenhet till mineralomvandling. Korrosionen av järn kan dessutom leda till ett högre pH vilket påverkar lösligheten av kisel och även montmorillonitens stabilitet.

Dessa interaktioner beskrevs inte i Fud-program 2007.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Undermarksförsöket Alternativa buffertmaterial (ABM) startades år 2006 vid Äspölaboratoriet. Försöket inkluderar elva olika lertyper med varierande smektithalt, typ av motjon och järnhalt. Kompakterade lerblock är i direkt kontakt med en central värmare av metalliskt järn. Värmaren har haft en måltemperatur på 130 °C. Studier av referenslerorna har utförts med fokus på mineralogiskt innehåll, men även mikrobiologisk karakterisering har utförts. Det första experimentpaketet (av totalt tre) bröts under våren 2009. Provtagningen och lagringen av leran har optimerats för att bevara redoxförhållanden i leran, vilket medger studier av järnets redoxkemi och dess påverkan på lerans egenskaper. I figur 24-15 ses ett bentonitprov av calcigel (block 5) från det upptagna ABM-paketet. Man ser tydliga färgskillnader från värmaren som suttit till vänster om provet. I området närmast värmaren uppmättes med XANES höga Fe(II)/Fe(III) kvoter jämfört med ursprungsleran.



Figur 24-15. Ett prov från ett block i ABM-försöket vid Äspölaboratoriet, med en tydlig reaktionszon mellan järn och bentonit. Provet är ungefär 4 cm långt.

SKB har även varit delaktig i analys av ett järn-bentonitprov från VTT (Technical Research Centre of Finland). Lerans mineralogiska innehåll och svällningsegenskaper (i rent vatten, fryst och i glykol) studerades med XRD (X-ray diffraction). Inga signifikanta förändringar kunde ses i montmorillonitens egenskaper. Med XANES mättes högre Fe(II)/Fe(III) kvoter upp i exponerat material jämfört med referensmaterialet.

Program

Studier med XANES på synkrotronen MAX-lab i Lund har påbörjats i syfte att kvantifiera Fe(II)/Fe(III) kvoten i lerorna från ABM. Fokus har lagts på tre leror: MX-80, Asha 505 och Deponit CaN. Test av svälltryck, hydraulisk konduktivitet samt karakterisering av mikrobiologiskt innehåll har påbörjats. För samtliga leror kommer katjonutbyteskapaciteten (CEC), utbytbara motjoner (EC) och vattenlösliga salter att bestämmas. Fasanalys med XRD kommer att utföras på bulkmaterial av samtliga leror från ABM och på de tre prioriterade även som uppenad lerfraktion jonbytt till Mg(II) och mättade med glykol. Detta är en standardteknik för att identifiera omvandlingar av montmorillonit till illit.

Inga fler ABM-paket förväntas att brytas under den närmaste 3-årsperioden. Det är dock uppenbart att det första paketet kommer att leverera intressanta resultat och det finns därför planer på att installera ett fjärde paket för att få större flexibilitet i brytningen i framtiden.

24.2.18 Lösning/fällning föroreningar

Den del av buffertmaterialet som inte utgörs av montmorillonit består av andra vanliga mineral, till exempel kvarts, fältspater, gips och kalcit, samt små mängder organiskt material. De accessoriska 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. Mineralutfällningar i bentoniten kan naturligtvis också inträffa som en följd av exempelvis montmorillonitombildning (se avsnitt 24.2.16) eller interaktion med grundvatten eller en skadad kapsel.

En mineralomfördelning kan förändra buffertens tätande egenskaper, samt de reologiska egenskaperna så att materialet blir sprödare och mer hållfast. Se även avsnitt 24.2.19.

Lösning och fällning av mineral påverkar även de processer som sker vid jonbyte och sorption, se avsnitt 24.2.15, genom att den lokala porvattenkemin påverkas, se avsnitt 24.1.12.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

De slutsatser från granskningen av Fud-program 2007 som presenterades i avsnitt 24.2.16 gäller även för denna process. SKI påpekar också att SKB bör testa VTT:s kemiska mätmetoder för kompakterad bentonit /24-38/.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Upplösning och diffusiv transport av gips har studerats i kalcium- och natrium-montmorillonit, se avsnitt 24.2.13.

En reaktiv transportmodellering har genomförts av försökspaket A2 i Lot-projektet. Enligt denna är den karaktäristiska anhydrit-profil som uppmäts i de delar av försökspaketet som utsatts för höga temperaturer bildad under vattenmättnadsprocessen.

En reaktiv transportmodellering har genomförts för att gränssätta inverkan av järnkorrosion på bentoniten i ett KBS-3H-förvar /24-33/. Resultaten indikerar stora magnetitutfällningar i direkt anslutning till järnkällan, samt en påverkan på bentoniten i ett begränsat område kring järnkällan. Resultat från laboratorieexperiment och fältförsök ABM (Alternativa buffert material) indikerar att området med påverkan är mer utbrett. En möjlig orsak till skillnaden mellan modellresultat och försöksresultat är en initial aerob korrosionsfas.

Program

I programmet ingår en uppdatering av den reaktiva transportmodelleringen av järnkorrosion i en KBS-3H-geometri. Vidare planeras fortsatta studier av hur accessoriska mineral urlakas, vilket är relevant för risk för kolloidbildning, se avsnitt 24.2.20. Cementeringseffekter kommer också att studeras under perioden, se avsnitt 24.2.19.

24.2.19 Cementering

Cementering är ett samlingsbegrepp för en uppsättning processer vilka leder till reologiska förändringar eller försämrade svällegenskaper hos bufferten. Effekten är emellertid så viktig att beakta för bufferten att den är samlad under en rubrik. Typiskt orsakas cementering av mineralutfällningar i bentonit och kopplingarna är därför starka till andra processer, bland annat montmorillonitombildning (avsnitt 24.2.16), lösning/fällning-föroreningar (avsnitt 24.2.18), diffusion (avsnitt 24.2.13), järn-bentonit-interaktioner (avsnitt 24.2.17) och jonbyte/sorption (avsnitt 24.2.15). Det finns två huvudskäl till att effekten av cementering är viktig att beakta i en bentonitbuffert:

- Förhöjd hydraulisk konduktivitet
Cementering orsakad av mineralutfällningar kan sänka porositeten. I icke-svällande material innebär detta oftast en sänkning av den hydrauliska konduktiviteten. I bentonit är det emellertid inte porositeten utan samspelet mellan vatten och montmorillonit som primärt bestämmer den hydrauliska konduktiviteten, se avsnitt 24.2.6. En cementeringsprocess vilken sänker porositeten kan därför leda till förhöjd hydraulisk konduktivitet om den samtidigt motverkar eller reducerar vatten/montmorillonit-samspelet, till exempel som en följd av montmorillonitombildning. Förhöjd hydraulisk konduktivitet kan, i sin tur, leda till advektiva förhållanden i bufferten, se avsnitt 24.2.12.
- Förhöjd skjuvhållfasthet
Cementering kan leda till en förhöjd skjuvhållfasthet av bufferten. En förskjutning av det omkringliggande berget (till exempel en jordbävning) kan då leda till att för stora spänningar överförs till kapseln, vilket kan öka risken för kapselskada, se kapitel 23. Utfällningar eller andra processer kan dessutom leda till en sprödare buffert eller minskad töjning vid brott.

Bentonitens svälltryck är en stark funktion av densitet, men uppvisar också stora hystereseffekter, det vill säga svälltrycket är också beroende av riktningen i en svällning/kompression-cykel, se avsnitt 24.2.9. Det är därför tänkbart att även de reologiska egenskaperna har ett liknande beroende så att en komprimerad bentonit uppvisar högre hållfasthet i jämförelse med ett uppsvällt prov vid samma densitet.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Mindre reologiska förändringar har uppmätts i försökspaket A2 i Lotserien, se avsnitt 24.2.16.

En omfattande studie har genomförts för att undersöka cementeringen som identifierades i det ordinarie undersökningsprogrammet för försökspaket A2 i Lotserien /24-28/. Ett stort antal serier enaxliga tryckförsök på preparerade cylindriska bentonitkutsar med höjd på två centimeter och diameter på två centimeter utsatta för olika temperaturer utfördes, se figur 24-16. Förutom olika temperaturer varierades även bland annat densitet, vattenmättnad och typ av bentonitmaterial.

En likartad cementeringseffekt som noterades i Lot-materialet uppmättes i laboratorieförsök redan efter värmeexponering (150–200 °C) under 24 timmar, se figur 24-17. Samma brottbeetende kunde också erhållas genom förhöjd densitet eller minskad vattenmättnad på proven.

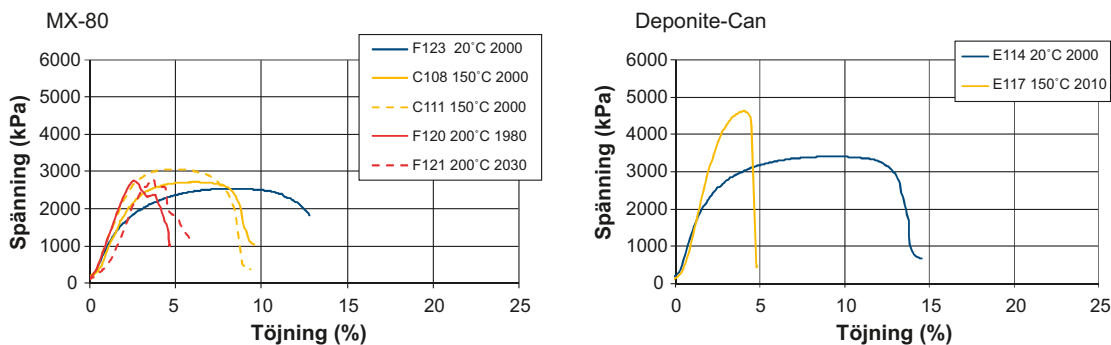
Materialet återtog sina ursprungliga reologiska egenskaper efter torkning, malning och återkompaktering.

Program

SKB kommer att fortsätta att studera reologiska effekter av cementering inom EU-projektet Pebes.



Figur 24-16. Exempel på ett enaxligt tryckförsök. Provet belastas med konstant deformationshastighet i axial-led till brott. Axial spänning och töjning mäts. Från /24-28/.



Figur 24-17. Exempel på cementeringseffekt: material exponerat för 150 °C eller 200 °C uppvisar minskad töjning vid brott i jämförelse med material med likartad densitet preparerat i rumstemperatur. Beteendet är detsamma för både natriumdominerad (MX-80) och calciumdominerad (Dep-Can) bentonit. Densitet anges sist i id-strängen med enhet kg/m³. Från /24-28/.

24.2.20 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 2007 och dess granskning

SKI anser att SKB behöver visa att kunskapen om bufferterrosion är tillräcklig innan ansökan lämnas in, bufferterrosionen och dess konsekvenser behöver gränsättas i säkerhetsanalysen och att det behövs dels en fast grund för beräkningar av konsekvenser, dels visas att bufferterrosion kan minskas med alternativa utformningar. SKI anser också att övergången mellan icke-eroderad och partiellt eroderad, det vill säga ett tillstånd fortfarande utan advektion, behöver utvärderas.

I granskningen av SAR-08 påpekar SSM att SKB bättre bör underbygga huvudscenariot som grund för bedömning av kravuppfyllelse gentemot SSM:s riskkriterium. Det behövs ett ytterligare beräkningsfall som visar inverkan av en rimlig barriärdegradering på karakteriseringen av risk, alternativt ett mera utförligt resonemang kring varför inverkan av samtliga rimligt sannolika barriärdegraderingsprocesser kan uteslutas för en tidsperiod upp till 40 000 år för förvarsdelarna BMA och Silo.

SSM anser också att det på längre sikt, så som vid uppdatering av kommande säkerhetsanalyser, även behövas fördjupade studier av hur bentonitbarriären påverkas av utspädda grundvatten. Inom SR-Can visades att det kustnära Forsmarksområdet påverkas av långa perioder med tempererade förhållanden på grund av landhöjning och infiltration av nederbördsvatten. Detta ger gradvis mera utspädda vatten och SSM anser därför att SKB behöver modellera utvecklingen av jonstyrka och undersöka om det finns någon risk att bentoniten som omger silon kan påverkas av sådana vatten. En sådan studie bör baseras på uppdaterad kunskap från pågående SKB-projekt om vilka grundvatten som potentiellt kan påverka bentonitstabilitet.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

SKB har genomfört ett projekt (Bentonite Erosion) för att studera erosion av bentonit i utspädda vatten. Syftet med projektet var att ta fram en kvantitativ modell för att bedöma omfattningen av erosionsprocessen i säkerhetsanalysen SR-Site. Projektet pågick 2007–2009. De olika faserna i projektet var litteraturstudier, modellering och experiment. Dessa beskrivs nedan.

Litteraturstudier och informationsinsamling

Målet med litteraturstudierna och informationsinsamlingen var att få förståelse och skaffa dataunderlag för att kunna formulera och utveckla en dynamisk kraftbalansmodell för hur montmorillonitlera expanderar i vatten och hur partiklarna kan bilda en stabil sol (kolloidal suspension). Följande krafter och mekanismer beaktades: van der Waals krafter, krafter förorsakade av det elektriska diffusa dubbelskiktet kring partiklarna, gravitationen, krafter som förorsakar Brownska rörelser och den mot rörelse motverkande friktionskraften. Ett antal modeller som används för att kvantifiera dessa krafter under olika kemiska förhållanden sammanfattades och diskuterades /24-39/.

Modellering

En av de viktigaste delarna av projektet var att utveckla en dynamisk modell för hur en bentonitgel expanderar i sprickor och suger upp utspätt vatten under expansionen /24-31/. Modellen ligger till grund för den kvantitativa hanteringen av processen i säkerhetsanalysen.

Modellen baseras på en beskrivning av kraftbalans mellan och på smektitpartiklarna i bentoniten, vilka rör sig i vattnet. Attraktiva van der Waalskrafter, elektriska dubbellagerkrafter, gravitation och krafter på partiklarna från den kemiska potentialens gradient påverkar partiklarnas rörelser i vattnet. Friktion mellan partiklarna och vattnet kan begränsa rörelserna. Dubbellagerkrafter beror starkt på typ och koncentration av joner i vattnet runt partiklarna. Den dynamiska modellen för gelexpansion har framgångsrikt testats mot experiment med gelutbredning i provrör i tid och rum.

En annan del av den kvantitativa modellen är en modell för viskositeten hos utspädda geler, vilken tar hänsyn till jonkoncentrationens påverkan och volymfraktionen smektit i gelen. Modellen tar hänsyn till närvaron av ett diffust dubbellager, vilket får partiklarna att verka större så att de kan interagera vid låga partikeldensiteter. Viskositetsmodellen använder experimentella data för vissa nödvändiga anpassningsparametrar, men baseras i övrigt på etablerade teorier om viskositet för suspensioner.

Dessa två modeller bildar kärnan till den kvantitativa modellen. Båda är starkt beroende av jonstyrkan i porvattnet. Simuleringar har genomförts för ett fall där gelen expanderar utåt i en spricka som skär deponeringshålet. Där passerar utspätt grundvatten genom gel/vattengränskskiktet. Smektitkolloider kan röra sig ut i vattnet med hjälp av de repulsiva krafterna mellan partiklarna och Brownsk rörelse (inkluderat i den dynamiska modellen). Den utspädda gel/solen mobiliseras och transporteras nedströms i en tunn region där viskositeten är tillräckligt låg för att tillåta flöde.

Natrium kommer att diffundera ut från den kompakterade leran, in och igenom den expanderande gelen mot gel/vattengränsskiktet och ut i det strömmande vattnet. Masstransportmotstånd för såväl joner som lerpartiklar är inkluderade i simuleringarna. Natriums koncentrationsprofil i gelen påverkar de repulsiva krafterna mellan partiklarna samt viskositeten i den expanderande gelen. Under de mest ogynnsamma förhållandena, det vill säga höga flödes hastigheter och stora sprickvidder, kan massförlusten av buffert bli hög. Resultat från simuleringar finns presenterade i tabell 24-2. Detta är den modell som används för att kvantifiera bentoniterosion under förhållanden med utspädda grundvatten i SR-Site.

Beräkningar har också gjorts för att bedöma under vilka kombinationer av flöde, grundvattensammansättning och initial sammansättning hos bentoniten, som vattensammansättningen i gel/vattengränsskiktet skulle kunna bli högre än den kritiska koaguleringskoncentrationen (CCC). Samtidigt studerades fördelningen mellan kalcium och natrium som motjon i leran i gränsskiktet. Anledningen till detta är att det har visat sig att om mer än 90 procent av motjonerna är tvåvärda, förändras lerans egenskaper radikalt och det finns indikationer på att en sådan lera inte skulle släppa ifrån kolloider över huvud taget.

En alternativ modell som använder effektivspänningsteori för att bedöma hur långt bentonit kan tränga ut i sprickor finns presenterad i /24-12/. Modellen baseras delvis på empiriska uttryck för hydraulisk konduktivitet utgående från laboratorieförsök samt på reologiska mätningar. Den modellen hanterar bara expansion fram till ett vatten/fast fasförhållande på 30. Efter det anses materialet som "förlorat".

En studie med Monte Carlosimuleringar av lera-vattensystemet har genomförts för att studera jonslagets betydelse för svällningen /24-40/. Simuleringarna predikterar en kraftig svällning med monovalenta motjoner, medan i närvaro av divalenta motjoner blir svällningen begränsad med ett ungefär en nanometer tjockt vattenlager mellan lerskikten. Resultaten från simuleringar av ett lamellärt lersystem är i perfekt överensstämmelse med lågvinkelröntgenmätningar (SAXS), men i konflikt med dialysexperiment. Uppenbarligen finns det en lamellär svällning och en "extralamellär" svällning.

Experiment

Inom projekt "Bentonite Erosion" har en mängd laboratoriestudier genomförts. Den största delen av dessa finns presenterade i /24-12/. Experimentella, men även teoretiska, studier har genomförts med avseende på:

- Frisvällningskapacitet.
- Reologiska egenskaper.
- Bentonitförlust via sprickor.
- Filtrering.
- Jonbyte.
- Solbildningsförmåga.
- Jondiffusion.
- Erosionsorsakad massförlust.

Tabell 24-2. Beräknad massförlust av buffert som funktion av vattenhastighet /24-31/.

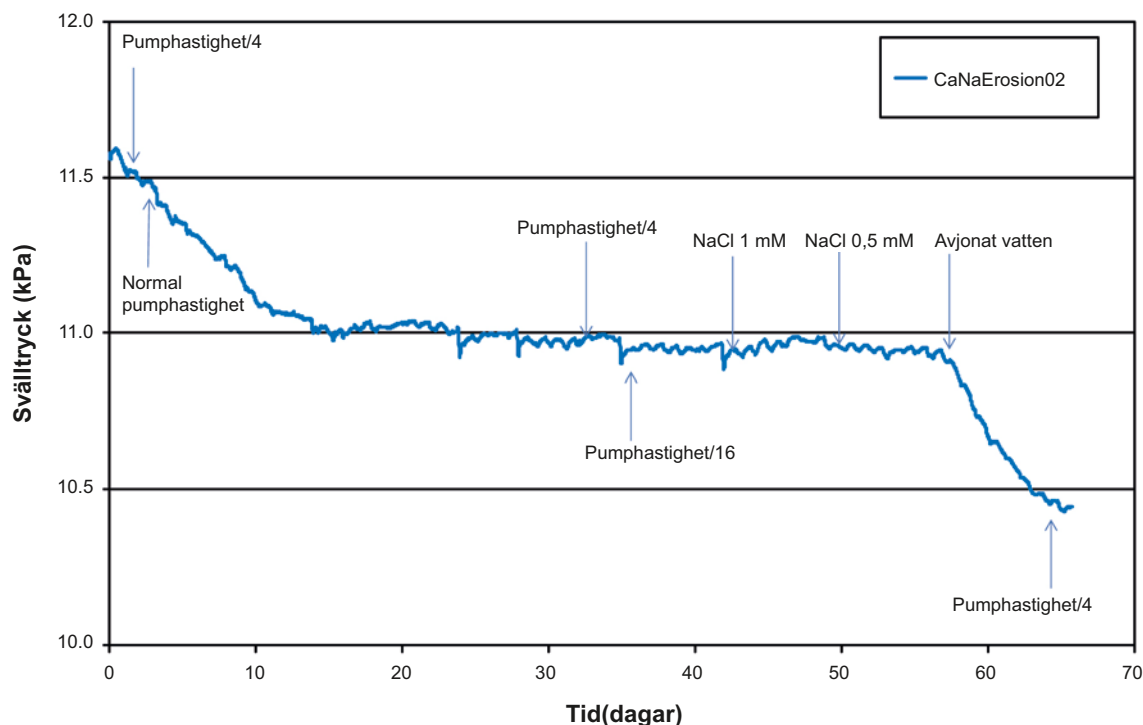
Vattenhastighet, m/år	Smektitfrigörelse för en spricka med 1 mm öppning, g/år	Inträngning av gel i sprickans centrum, m
0,10	11	34,6
0,32	16	18,5
0,95	26	11,5
3,15	43	7,0
31,50	117	2,1
315,00	292	0,5

Utifrån de experimentella resultaten har en mängd observationer gjorts, men den viktigaste frågeställningen har varit att bestämma under vilka förhållanden som erosion av bentonit kan ske. I SR-Can användes en kritisk koaguleringskoncentration (CCC) av en mM $[M^{2+}]$ eller 100 mM $[M^+]$ som kriterium för när bentoniterosion kunde förekomma. Resultaten från experimenten visar dock att det är en alltför förenklad bild. I ett system med enbart envärda joner, Na(I), kan leran expandera "oändligt" och det behövs cirka 25 mM Na^+ för att stoppa kolloidbildningen. Om leran däremot enbart innehåller tvåvärda joner, Ca(II), bildas inga kolloider ens med destillerat vatten. I ett verkligt system med både natrium och kalcium finns det inget entydigt värde på CCC, eftersom det är beroende både av innehållet av motjoner i leran och av sammansättningen på vattnet.

Kolloidfrigörelse och erosion vid låga jonstyrkor har studerats experimentellt i en svälltryckscell där initialt rena NaCl-lösningar har cirkulerats i kontakt med en blandad Ca/Na-montmorillonit. Vid låga jonstyrkor är NaCl-lösningen väldigt nära jämvikt, eftersom i princip allt kalcium stannar i leran. Resultat från ett sådant försök visas i figur 24-18 och en summering av resultat från flera tester finns i tabell 24-3.

Tabell 24-3. Summering av erosionsexperimenten med Ca/Na-montmorillonit från /24-12/. X-kolumnen visar laddningsfraktionen av kalcium i leran. Kolumnen Gräns för stabilitet visar den lägsta halt av NaCl för vilken ingen erosion kunde detekteras.

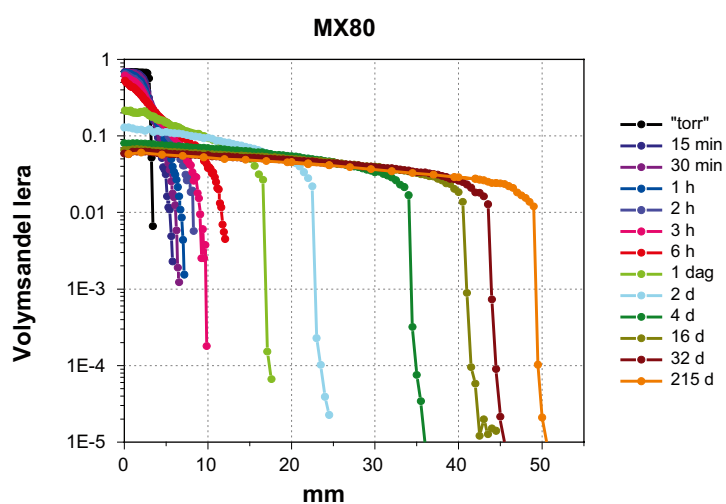
Prov	Typ av lera	X	Gräns för stabilitet $[Na^+]$
CaNaErosion01	Milos	0,5	2 mM
CaNaErosion02	Milos	0,5	0,5 mM
CaNaErosion03	Milos	0,25	1 mM
CaNaErosion04	Milos	0,75	3 mM
CaNaErosion05	Wyoming	0,5	4 mM
CaNaErosion06	Kutch	0,5	1 mM



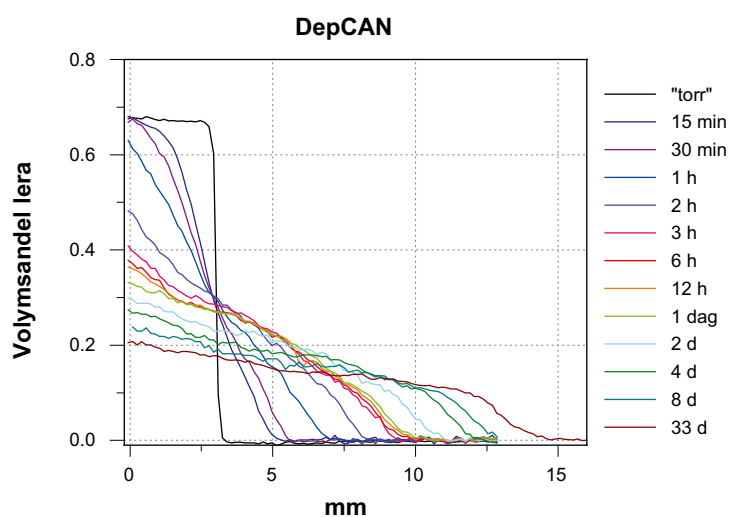
Figur 24-18. Svälltrycksutveckling i erosionstest CaNaErosion02 /24-12/. Montmorilloniten är av Milostyp och jonpopulationen är 50/50 Ca/Na. Lösningen består av två mM NaCl(aq) vid början av den visade tidsperioden. Notera att erosionen upphör spontant vid dag 15 utan förändring i varken pumphastighet eller lösning. Vid dag 57 ersätts lösningen med avjoniserat vatten och förlusten av montmorillonit påbörjas igen, vilket påvisar sambandet mellan bildning av kolloidal sol och jonstyrka.

De genomförda erosionsförsöken visar att erosion inte uppträder i en blandad kalcium/natrium-montmorillonit, i vilken minst 20 procent av motjonerna utgörs av kalcium, när den externa lösningen innehåller mer än fyra mM laddningsekvivalenter. Dessa resultat är i samklang med det framlagda konceptuella synsättet för solbildning och uppmätta jämviktsegenskaper hos blandad kalcium/natrium-montmorillonit. Det är inte troligt att det någonsin kommer att vara en lägre andel tvåvärda motjoner i bufferten än 20 procent.

I en annan studie /24-41/ användes NMR (Nuclear magnetic resonance) för att studera svällning av olika leror under olika förhållanden. Exempel på resultat finns i figur 24-19 och figur 24-20. Resultaten visar att både kalcium och natriumdominerade leror sväller snabbt och att även kalciumlera kan expandera till fyra gånger sin ursprungliga volym. Resultaten från NMR-försöken har använts för att testa den dynamiska modellen i /24-31/ och testen har varit lyckade.



Figur 24-19. Svällning av naturlig MX-80 i destillerat vatten (notera den logaritmiska skalan på y-axeln) /24-41/.



Figur 24-20. Svällning av naturlig Deponit CaN i destillerat vatten (notera den linjära skalan på y-axeln) /24-41/.

Projektet har även inkluderat studier av möjligheten att stoppa kolloidfrigörelse med naturliga eller konstgjorda filter. Bentonitlerans möjlighet att självläka vid lakning med avjoniserat vatten studerades i /24-42/. Undersökningen fokuserade på bildandet av en filterkaka från accessoriska partiklar i MX-80 och separationen av fast material för en lösning innehållande 1 procent smektit som passerar filterkakan vid en tryckskillnad på fem bar. Experimenten visade en bra separation av smektitpartiklar från lösningen när den passerade filterkakan. För alla testade fall blev separationen nästintill fullständig efter tillräckligt lång tid. Detta indikerar att filterkakan hade tillräckligt små porer för att fungera som ett geometriskt hinder för de små partiklarna. Resultat från /24-12/ visar också att filterstorlekar på mindre än $0,5 \mu\text{m}$ effektivt stoppar alla montmorillonitpartiklar från att ta sig igenom medan en filterstorlek på två μm inte har nämnvärd påverkan på erosionen. Detta illustreras i figur 24-21.

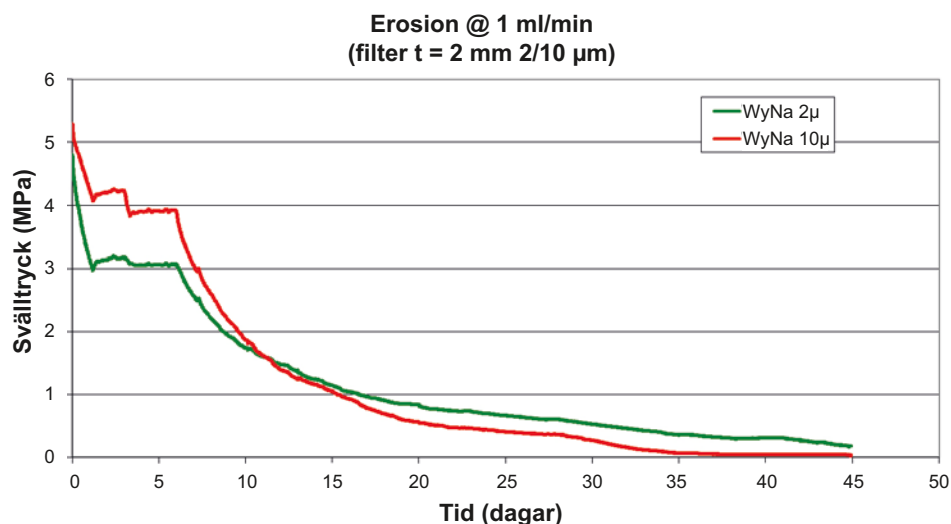
Program

Trots stora insatser ger resultaten från projekt "Bentonite Erosion" ingen klar och tydlig bild över hur processen kan kvantifieras. Den modell som presenteras i /24-31/ bygger i princip på ett rent Na-system och överskattar troligtvis erosionen. För att i kommande säkerhetsredovisningar få mer realistiska, mindre konservativa resultat, är det därför viktigt att fortsätta med ytterligare studier inom området.

Det finns fortfarande osäkerheter om hur kalcium påverkar processen särskilt i blandade Na/Ca-system. Ett doktorandprojekt har därför startats med syftet att bygga upp en modell som kan beskriva svällning och erosion hos kalciumbentonit.

Den verkliga erosionen sker i en spricka, medan de flesta försök har genomförts i öppna rör eller genom filter. Därför kommer ytterligare försök med erosion i spalter med olika vidder att genomföras. Dessa kommer att kombineras med försök med olika flöden för att avgöra flödes hastighetens betydelse för processen.

De modeller och beskrivningar som tas fram för bufferten är tillämpbara också på återfyllning och bentoniten i SFR-silon.



Figur 24-21. Erosion som funktion av filterstorlek (2 och 10 μm) för ren Wyoming Na-montmorillonit (WyNa) i destillerat vatten /24-12/.

24.2.21 Strålinducerad montmorillonitombildning

Montmorillonit i bufferten kan brytas ned av radioaktiv strålning. Resultatet blir i så fall en minskning av montmorillonithalten och en förändring av bentonitens egenskaper. Experiment har emellertid visat att den ackumulerade stråldosen, som bentoniten kommer att utsättas för i ett slutförvar, inte orsakar några mätbara förändringar av montmorillonithalten eller bentonitens egenskaper. I projektet SR-Site baseras hanteringen av denna process på samma underlag som användes i Andras säkerhetsanalys Dossier-2005. Inga ytterligare studier planeras inom området.

24.2.22 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 gammastrålning på utsidan ska bli försumbar, se avsnitt 23.2.5.

24.2.23 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. Eftersom processen primärt är av betydelse för kapselns egenskaper hanteras den i kapitel 23.

I återfyllningsmaterialet ökar möjligheterna till bakteriell aktivitet med minskande densitet och ökande vattentillgång. Där finns också större mängder av järn och organiskt material.

24.2.24 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.

Radionuklider antas kunna transporteras både advektivt och diffusivt genom deponeringstunnlarna. I normalfallet antas den diffusiva transporten vara dominerande och den advektiva transporten försumbar. Men om återfyllningens konduktivitet av någon anledning skulle vara högre, kan den advektiva materialtransporten få betydelse för säkerhetsanalysen av ett KBS-3-förvar.

Transport i återfyllningen är inkluderad i den integrerade beskrivningen av transport i berget, se avsnitt 25.3.4.

I SR-Site beräknas även radionuklidtransporten för ett fall då bufferten gått förlorad och då mass-transporten domineras av advektion. Hanteringen är densamma som i SR-Can.

24.2.25 Radionuklidtransport – diffusion

Transporten av radionuklider genom bufferten sker med olika diffusionsmekanismer. Det är klarlagt att vissa katjoner kan ha höga diffusiviteter (transporteras effektivare).

Det finns olika synsätt på hur diffusion sker i bentonit. Enkelt uttryckt baseras dessa antingen på en modell där bentoniten ses som ett homogent medium eller en modell där det finns en porositet inuti lerpartiklarna och en annan emellan dem och transport av negativt laddade specier enbart kan ske mellan partiklarna.

För SKB:s säkerhetsanalyser används ett mer praktiskt synsätt som i princip baseras på uppmätta diffusiviteter. Se även radionuklidtransport i SFR, kapitel 21.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI föreslår att SKB gör känslighetsanalyser för att identifiera viktiga nuklider och parametrar för sorption och diffusion i bentonit och att val av parametrar för sorption och diffusion behöver ses över när buffertmaterial slutgiltigt valts och vattenkemin på platserna bestämts.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Det underlag för radionuklidspecifika diffusiviteter som togs fram för SR-Can /24-43/ kommer också att användas i SR-Site. En viss bearbetning har dock skett för att passa till de krav som ställs från SR-Sites datarapport.

Det experimentella program som planerades för att verifiera modellen för transport mellan det stillastående vattnet och bufferten och det strömmande vattnet i en spricka har inte levererat några användbara resultat ännu. Detta beror delvis på att utrustningen använts i bentoniterosionsprojektet och delvis på att geometrin kanske inte var den mest lämpade för uppgiften.

Program

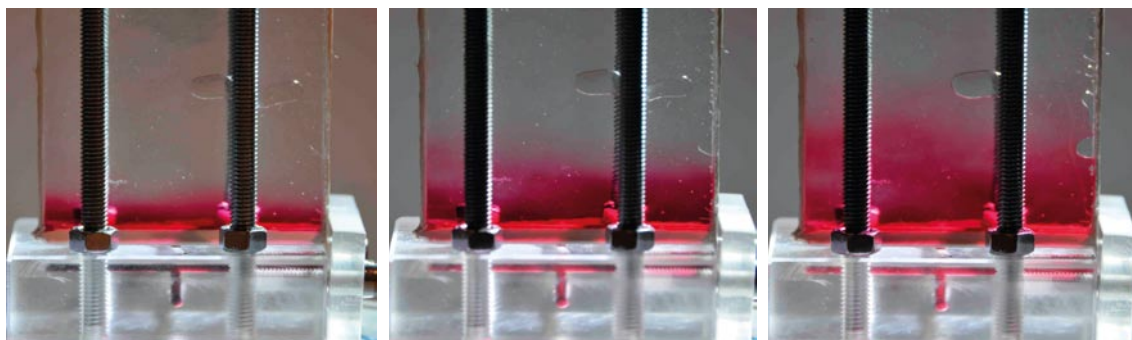
När det gäller data för både sorption och diffusion av radionuklider anser SKB att underlaget är tillräckligt för säkerhetsanalysens behov. Den transienta transporten av nuklider genom bufferten har relativt liten betydelse i de viktigaste fallen i nuklidspredningsberäkningarna.

Programmet med att verifiera modellen för transport mellan det stillastående vattnet och bufferten och det strömmande vattnet i en spricka kommer att fortsätta. Tanken är att göra experiment i relativt liten skala för att snabbt kunna producera resultat och göra parametervariationer. Figur 24-22 visar resultat från preliminära småskaliga försök med diffusion av ett färgämne i en spalt med variabel apertur. En statusrapport som beskriver den konceptuella modellen för flödesmotståndet (Q_{ekv}) tillsammans med de osäkerheter som finns i modellen tas fram inom SR-Site.

24.2.26 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 laddningskompenserande 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.



Figur 24-22. Resultat från preliminära försök med diffusion av ett färgämne i en spalt med en vidd av 50 millimeter. Bilderna är tagna efter 41 minuter, 18 timmar respektive 67 timmar.

SKB anser inte att sorption av radionuklider i bentonit är ett prioriterat forskningsområde. Inför varje ny säkerhetsredovisning kommer dock befintligt material att uppdateras med ny information.

Programmet för jonbyte/sorption (avsnitt 24.2.15) är starkt sammankopplat med programmet för diffusion, se avsnitt 24.2.13.

Återfyllningsmaterialet har ändrats mellan SR-Can och SR-Site. De data som används för radionuklidtransport i SR-Sites datarapport är anpassade efter den nya sammansättningen. I övrigt är sorption i återfyllningen inte ett prioriterat forskningsområde och inga nya insatser planeras under den närmaste perioden.

24.2.27 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 kapitel 22.

24.2.28 Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit

Om kolloider kan transporteras genom bentoniten kan denna transportväg medverka till den totala radionuklidtransporten. 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. Den kompakterade bentoniten har emellertid filtrerande egenskaper och dessa egenskaper studeras närmare här.

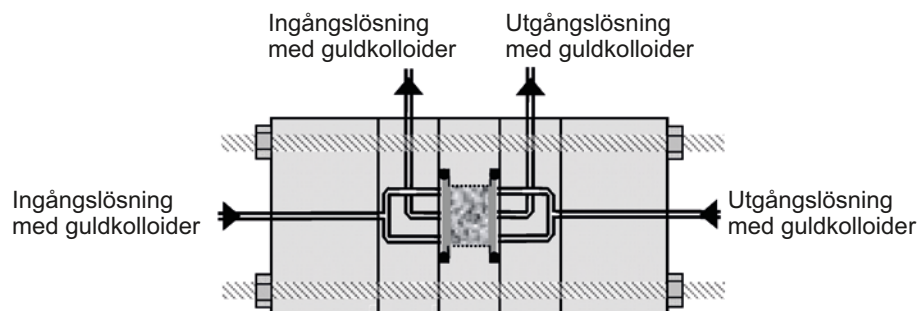
Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades en studie av kolloiddiffusion av guldkolloider med syfte att undersöka om det finns en specifik filteringsgräns för kolloider i bentonit.

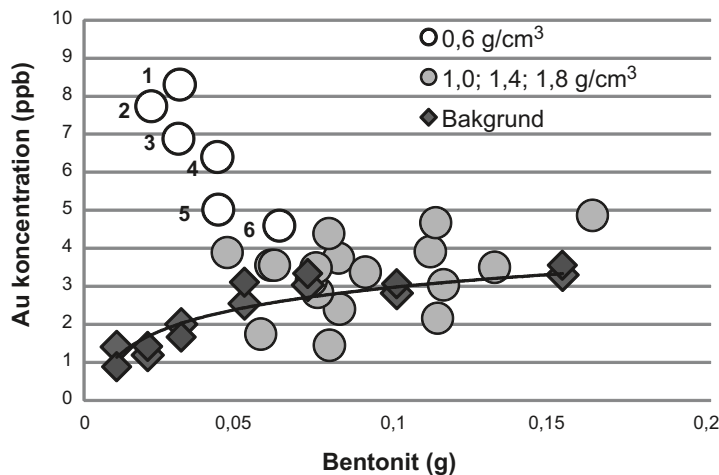
I granskningen av Fud-program 2007 ges ingen specifik kommentar om programmet för kolloidtransport genom bentonit. SKI påpekar att bentoniterosion kan påverka bentonitens förmåga att filtrera kolloider.

Nyväunnen kunskap sedan Fud 2007

Kolloidfiltrering i kompakterad bentonit har studerats /24-44/ för att undersöka om kolloider effektivt filtreras av kompakterad bentonit, samt för att studera vilka eventuella diffusionsvägar som finns. Ett underliggande syfte är också att studera om oorganiska och organiska kolloider har olika diffusionsegenskaper. I tre kolloidfiltreringsexperiment användes små guldkolloider; två, fem samt 15 nm som kolloidala tracers, figur 24-23. Från dessa experiment drogs slutsatsen att bentonitens mikrostruktur effektivt filtrerar även mycket små oorganiska kolloider. Transport av guldkolloider kunde endast påvisas vid en så låg torrdensitet, ($0,6 \text{ g/cm}^3$, se figur 24-24), att medelavståndet mellan montmorillonitflaken överskred de minsta kolloidernas storlek, två nm. Dessa resultat indikerar på att den faktiska flaskhalsen för eventuell kolloid diffusion i bentonit utgörs av transport mellan montmorillonitflaken.



Figur 24-23. Försöksupställning för kolloidfiltreringsförsöket.



Figur 24-24. Guldkoncentrationer mätta med ICP-OES för 2 nm försöket. Endast vid den lägsta kompaktionen hittades signifikanta guldkoncentrationer.

Program

Resultaten från det program som genomförts är entydiga. Inga ytterligare insatser planeras.

24.3 Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet

I säkerhetsanalysen SR-Can samt i den pågående analysen SR-Site studeras en rad fall för radionuklidtransport i närområdet. I SR-Can var det viktigaste riskbidragande fallet ett med delvis eroderad buffert runt deponeringshålet. Andra fall som analyserats i närområdet är ett där kapseln skjuvas sönder på grund av jordskalv och ett där återfyllningen i tunneln kollapsar och vatten kan flöda fritt överst i tunneln. Ett hypotetiskt fall med en kapseldefekt som gradvis expanderar analyseras också.

Samtliga dessa fall modelleras med den numeriska modellen Compulink /24-45/. Modellen omfattar bränsleupplösning, utfällning i kapselns inre vattenfyllda hålrum, transport genom en defekt kapsel, diffusiv transport i bufferten samt advektiv och diffusiv transport i tunnelåterfyllningen. Modelleringen ger som resultat utsläpp av radionuklider från närområdet, som i sin tur utgör indata till motsvarande modellering i fjärrområdet, se avsnitt 25.3.4.

Mindre modifieringar av den befintliga programkoden Compulink för närområdet bedrivs inom säkerhetsanalysen SR-Site.

25 Geosfären

25.1 Initialtillstånd för geosfären

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 påverkats. Resultatet av platsundersökningarna och detaljundersökningarna samt resultatet av bergarbetena är det primära underlaget för att kunna bestämma geosfärens tillstånd efter förslutning.

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. De krav och förutsättningar som gäller för bergutrymmena beskrivs i programmet för teknikutveckling berg (kapitel 15).

Initialtillståndet för geosfären fastställs delvis med hjälp av de metoder som beskrivs i avsnitt 15.4 vilket behandlar detaljundersökningsprogrammet och den vidareutveckling av metoder som planeras för kartering och mätning av bergets termiska, mekaniska och hydrauliska egenskaper. Bergets initiala transportegenskaper och hydrogeokemiska tillstånd utgör också en del av initialtillståndet. Dessa initiala egenskaper och tillstånd förändras med tiden genom de processer som beskrivs nedan.

25.2 Processer i geosfären

25.2.1 Översikt av processer

Värme som alstras i bränslet leds ut via kapseln och bufferten och värmer upp det omgivande berget. Genom grundvattenströmning omfördelas grundvattnet i geosfärens spricksystem. Även gasmigration kan förekomma. I geosfären råder initialt ett mekaniskt tillstånd som bestäms av de naturliga bergspänningarna och spricksystemen på förvarsplatsen samt 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, framför allt i samband med 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.

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, vilket ger upphov till upplösning och utfällning 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. När det gäller de mekaniska processerna är de i verkligheten starkt kopplade till varandra, varför det i de nedanstående delkapitlen är svårt att renodla redovisningarna. Den utveckling som sker inom modellering, där processer hanteras integrerat, presenteras i slutet av kapitlet.

25.2.2 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 redovisades en termisk analys av kapsel/buffert-systemet /25-1/. Vidare redovisades en principiell metod för uppskalning av laboratoriebestämningar av värmeledningstalet hos olika bergarter till skalor som är relevanta för beräkning av temperaturutvecklingen hos enskilda kapslar i typiska deponeringsgeometrier /25-2/. Uppskalningsmetoden beaktar variabilitet inom bergarter och mellan bergarter. Utifrån idealiserade mineralsammansättningar för magmatiska bergarter demonstrerades ett generellt samband mellan densitet och värmeledningsförmåga /25-3, 25-4/.

Randvillkor till termo-hydro-mekaniska modeller (THM-modeller) av buffertens utveckling mot vattenmättnad definierades med hjälp av studier av temperaturutvecklingen i Prototypförvarets, vid Äspö, bergmassa /25-5/.

SKI konstaterade att SKB på ett bättre vis uppmärksammat inverkan från utsprängningen på såväl det bergmekaniska som termiska initialtillståndet. Vidare ansåg SKI att SKB framgångsrikt utvecklat termiska modeller för Forsmark och Laxemar samt att SKB visat att man kan beräkna temperaturutvecklingen i bergmassa och buffert, inklusive spalt mellan kapsel och buffert, med hjälp av data från Prototypförvaret i Äspö. SKI uttryckte sitt stöd för SKB:s program om geostatistiska metoder för att uppskatta och begränsa osäkerheter i temperaturberäkningar.

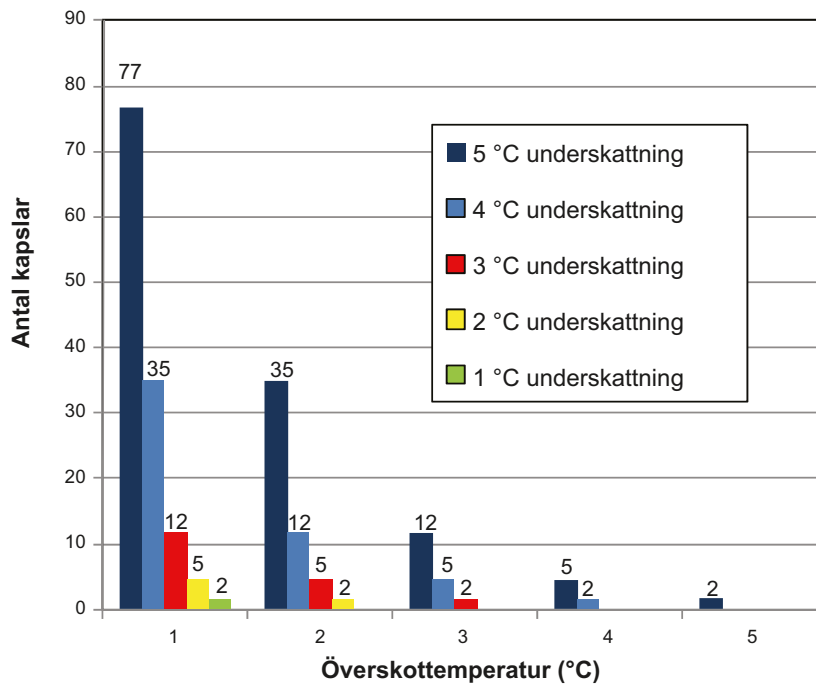
Kärnavfallsrådet ansåg fortsatt utveckling av rationella och billiga fältmetoder för bestämning av termiska egenskaper, särskilt fullskalemetoder, som angelägna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Arbetet med principerna för de termiska modelleringarna av platserna Forsmark och Laxemar har fortsatt. Den rumsliga variationen och uppskalning till relevanta modelleringsskalor har kopplats till de geologiska platsmodellerna och analyserats med geostatistiska metoder /25-3, 25-6, 25-7, 25-8/.

Även arbetet med att kvantifiera och begränsa osäkerheter i temperaturberäkningar har fortsatt, liksom utvecklingen av såväl fält- som laboriemetoder för bestämning av termiska egenskaper. /25-9, 25-10/. Fokus har varit metoder avseende bestämningar av kapselavstånden i deponeringstunnlar, vilka bland annat är beroende av de termiska förhållandena. Detta innebär att man nu på ett adekvat sätt kan ta hänsyn till fördelning och rumslig korrelation av värmeledningsegenskaper i dimensioneringsberäkningarna, det vill säga i de beräkningar som ligger till grund för kapselavstånden i de olika bergdomänerna för layout D2 /25-11/. Syftet med dessa beräkningar är att säkerställa att bufferttemperaturen inte överskrider 100 °C för någon kapsel vid något tillfälle samtidigt som man effektivt utnyttjar den tillgängliga bergvolymen. En viktig del i dimensioneringsberäkningar är att bestämma en tillräcklig, men inte överdriven, osäkerhetsmarginal.

I den så kallade THM-rapporten för geosfären /25-12/ analyseras konsekvenserna, i termer av antal påverkade kapslar, om den totala osäkerhetsmarginalen i dimensioneringsberäkningarna av någon anledning skulle visa sig vara otillräcklig. Resultatet exemplifieras i figur 25-1 och avser temperaturfördelningen vid tiden för temperaturmaximum hos 6 000 kapslar som deponeras enligt layout D2 i Forsmark. Figuren illustrerar överskotttemperaturer hos kapslar för olika antaganden om hur marginalbehovet underskattats i dimensioneringsberäkningarna. Marginalerna kan bero av variationer i bergets värmeledningstal.



Figur 25-1. Överskottstemperaturer hos kapslar deponerande enligt layout D2 i Forsmark för olika antaganden om hur marginalbehovet underskattats i dimensioneringsberäkningarna. Om marginalen exempelvis skulle ha underskattats med 3 °C, kommer cirka två kapslar att bli 3 °C för heta, fem kapslar cirka 2 °C för heta och tolv kapslar cirka 1 °C för heta. Uppskattningen gäller om alla dessa deponeringshål är fullständigt torra vid tiden för temperaturmaximum (från /15-11/).

Temperaturdata i borrhål från Laxemar och Forsmark har använts för att bestämma temperaturen på förvarsdjup och för att bekräfta vattenströmning från hydrauliska mätmetoder. Temperaturfördelningen innehåller emellertid mer information. Ett separat projekt har undersökt rumslig variation av värmeledningsförmågan i större skala och analyserat spår av historiska klimatförändringar /25-13/. Se vidare kapitel 19.

Program

Utvecklingsarbetet om mätning av termiska egenskaper kommer huvudsakligen att bedrivas inom Detaljundersökningsprogrammet, se avsnitt 15.4.

Viss modellutveckling om termiska processer kommer att ske inom ramen för analys av det så kallade Prototypförvaret vid Äspö.

25.2.3 Grundvattenströmning

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Programmet som presenterades i Fud-program 2007 involverade främst modelleringsstudier och utveckling av koderna ConnectFlow, DarcyTools och Mike She.

I bedömningen ansåg SKI att det av SKB presenterade programmet för grundvattenströmning hade en lämplig detaljeringsgrad och generellt sett var ändamålsenligt. Vidare ansåg SKI att SKB gjort framsteg i den hydrologiska modelleringen och fått viktiga praktiska erfarenheter genom tillämpningen av modellerna i platsmodelleringen och säkerhetsanalysen SR-Can. SKI saknade emellertid kopplingar från redovisningen av grundvattenströmningen till andra discipliner och avsnitt i Fud-programmet, exempelvis kopplingar som finns till glacial hydrologi, geokemi, piping/erosion av buffert och återfyllning, biosfärkapitlet och bergmekaniska processer.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Under innevarande period (2007–2009) har ett stort antal modelleringsstudier utförts inom ramen för den platsbeskrivande modelleringen och ett antal studier har påbörjats inom säkerhetsanalysprojektet SR-Site. Dessa studier har främst gett en ökad förståelse av grundvattenflödesmodellering med plats specifika data, och modellering inom säkerhetsanalysen med en detaljbild av Kärnbränsleförvaret med hög upplösning.

De viktigaste studierna inom platsmodelleringen är för Forsmark /25-14, 25-15, 25-16, 25-17/ samt för Laxemar /25-18, 25-19, 25-20/. I den slutliga grundvattenmodellen för Forsmark /25-14/ har ett högkonduktivt lager inkluderats i modellens övre del. Det högkonduktiva lagret representerar de vattenförande bankningsplan som påträffats i berggrunden. Det högkonduktiva lagret dämpar topografins betydelse för grundvattenströmningens flödesmönster på större djup. Detta svarar på en explicit fråga i SKI:s utvärdering av tidigare Fud-program.

Inom SR-Site och för platsvalet har platsmodellerna för Forsmark och Laxemar tillämpats för de olika tidsperioder som ingår i analysen, det vill säga för perioden med ett öppet förvar /25-21/, för den tempererade perioden, samt för den glaciala perioden /25-22/. I koden DarcyTools har en utveckling skett för att kunna studera återmättnadsprocessen av ett initieellt omättat återfyllnadsmaterial /25-21, 25-23/. Simuleringarna för den glaciala perioden, som består av kombinationerna permafrost, kombinerad permafrost och inlandsis samt enbart inlandsis, har bidragit med en betydande ny förståelse av grundvattenströmning under glaciala förhållanden relativt kunskapsnivån vid genomförandet av SR-Can. Specifikt visar studien /25-22/ hur en inlandsis kombinerad med permafrost och så kallade taliks (öppningar i permafrosten) kan påverka grundvattenströmningen till både magnitud och riktning vid ett tänkt förvarsdjup i berget. Platsspecifikt input från Klimatprogrammet har använts i möjligaste mån /25-24/ gällande isprofiler och permafrostutveckling i dessa simuleringar. Modellerna är dock fortfarande grundade på ett flertal antaganden som i dagsläget inte kan bekräftas fullt ut. En förbättrad förståelse av dessa antaganden förväntas som resultat i Greenland Analogue Project (GAP) som beskrivs nedan under Program samt i avsnitt 19.6.

Under perioden (2007–2009) har ett antal hydrogeologiska studier genomförts som gett en ökad förståelse för förhållandena runt SFR. För säkerhetsanalysprojektet SAR-08 utfördes en modelleringsstudie för att ta fram osäkerhetsfaktorer för tidigare gjorda simuleringar samt analysera flödesvägar från SFR /25-25/. Denna studie var ett komplement till de simuleringar som gjordes för SAFE-projektet /25-26/. Innan arbetet med projekt SFR-utbyggnad startade, utfördes en studie där flöde genom tunnlar och framtida flödesvägar från en eventuell utbyggnad av SFR analyserades /25-27/. I rapporten fastslogs att det var fördelaktigt att genomföra en utbyggnad söder om befintlig SFR-anläggning. Detta beroende på längre framtida flödesvägar samt annan recipient än för den befintliga SFR-anläggningen. Som ett första steg för den hydrogeologiska modelleringen inom projekt SFR-utbyggnad sattes en modell upp i DarcyTools /25-28/ med en liknande parameterisering som användes i en tidigare modellering med koden GEOAN /25-26/. En viktig slutsats från simuleringarna var att de framtida vattendelarna som använts för att definiera modellområdet behöver studeras i mer detalj och eventuellt uppdateras. I ett andra steg använde /25-29/ samma hydrauliska dataunderlag som redovisas i /25-26/ för att parameterisera en preliminär version av den nya deformationzonsmodellen för SFR-området /25-30/. En modelleringsstudie /25-31/ genomfördes med parameteriseringen från /25-29/ för att undersöka om piren ovanför den befintliga SFR-anläggningen fungerar som en vattendelare även i framtiden, det vill säga om grundvattenytan kan upprätthållas inne i piren. Denna studie visade att beskrivningen av den framtida ythydrologin (framtida år, sjöar med mera) har större betydelse för den ytnära grundvattenströmningen i framtiden, än vad pirens hydrauliska egenskaper har. Studien belyste att en kodutveckling för hanteringen av de ythydrologiska processerna i DarcyTools kan vara lämpligt när ytliga förvar som SFR studeras. Vidare framkom även att det behövdes en uppdatering av algoritmen för partikelspårning i DarcyTools. Uppdateringen genomfördes under år 2009 och medförde en mer flexibel och användarvänlig metod, i synnerhet för så kallade steady-state lösningar (fortvarighetstillstånd).

SKB har under innevarande tidsperiod fortsatt de storregionala simuleringar som pågått sedan tidigare. En uppföljande fördjupad studie där fokus ligger på konceptuella osäkerheter har publicerats /25-32/. En ytterligare studie med kompletteringar har genomförts /25-33/. Den kompletterande studiens syfte har varit att redovisa en fördjupad utvärdering av konceptuella förenklingar och modellösäkerheter vid storregional grundvattenmodellering, till exempel modelldjup, topografi,

grundvattenytans läge och modellränder. Vidare studerades lokala platsegenskaper för ett slutförvar i perspektiv av regionala flödesvägar. Den modellerade regionen sammanfaller med den tidigare studiens, det vill säga östra Småland. I den tidigare modellen /25-32/ antogs grundvattenytans position vara densamma som markytans topografi, med undantag för områden med glacifluviala sediment och områden under havet. Ett fluxrandvillkor med ytvattenavrinning på toppen av modellen är dock att föredra framför föreskrivna nivåer på grundvattenytans läge, eftersom ett fluxrandvillkor är en bättre approximation av systemets verkliga beteende. Med fluxrandvillkor kan konstateras att de specifika flödena vid flödesvägarnas startpunkter på förvarsnivå minskar, jämfört med en modell baserat på föreskrivna nivåer på grundvattenytan samt att såväl flödesvägarnas längder som partiklarnas transporttider ökar något. När det gäller flödescellernas djupgående i en storregional modell visar en känslighetsstudie att det tunga saltvattnet beläget på större djup än förvarsdjup till stor del förhindrar flödesvägar från att nå ned till ännu större djup. I /25-33/ jämfördes även simulerade egenskaper för flödesvägar från ett ur hydrauliskt perspektiv fördelaktigt område med simulerade egenskaper för flödesvägar från det regionala modellområdet i Laxemar. Det utvalda området ligger i Viråns avrinningsområde cirka 30 kilometer från kusten. I verkligheten dominerar området litologiskt av basiska bergarter och uppfyller inte nödvändigtvis alla krav och kriterier som ställs på ett förvar. Många av flödesvägarna från det utvalda området är långa och sträcker sig mot kustlinjen samt når ner till stort djup. När flödesvägarna närmar sig kustlinjen tenderar de att vända uppåt mot kustlinjen från stort djup. Jämförelsen mellan de två områdena har visat att det framför allt är transporttiderna som är betydligt längre från det utvalda området men att variationen i transporttider är extremt stor. En storregional modellens vertikala randvillkor och ytvattendelares betydelse vid simulering av flödesvägar har utretts i ett separat projekt /25-34/.

Den ythydrologiska modelleringen har under innevarande period utvecklats främst inom platsbeskrivande modellering /25-35, 25-36/ och den pågående säkerhetsanalysen SR-Site, se även avsnitt 26.6. Den ythydrologiska modelleringen syftar i första hand till att utveckla förståelsen avseende grundvattnet i jordlagren och dess kopplingar till ytvatten, atmosfär och grundvatten i berg, samt till att förse biosfärmodelleringen med indata. Utveckling av numeriska modeller i Mike She /25-37, 25-38/ och kalibreringar av dessa mot uppmätta vattennivåer och flöden har varit viktiga komponenter i detta arbete. Resultat från dessa modelleringsinsatser har använts som underlag för beskrivning av randvillkor och jordlagrens egenskaper i modellerna för grundvattenströmningen i berget. På motsvarande sätt har beskrivningar av bergets egenskaper överförts till de ythydrologiska modellerna. Detta innebär att kopplingen mellan ythydrologin och bergets hydrogeologi i platsbeskrivningar och säkerhetsanalyser har stärkts under perioden.

Hyperkonvergenskonceptet, utarbetat i /25-39/, har applicerats på fältdata i /25-40/. Studien indikerar att grundvatten strömmar i ett glest kanalnätverk strax över perkolationsgränsen, samt vidare att de aktivt flödande kanalerna bara är en mindre delmängd av samtliga tillgängliga kanaler. Resultatet av denna studie indikerar att kanalbildning, så kallad channeling, bör inkorporeras i de modellverktyg som används. Channeling diskuteras i avsnitt 25.2.11.

Program

En viss vidareutveckling av grundvattenflödeskoderna DarcyTools och ConnectFlow planeras för kommande period. Denna utveckling kommer dock inte att påverka slutsatserna i SR-Site. För DarcyTools pågår utveckling av en version baserad på Navier-Stokes flödeslösning. Denna har redan använts för injektering, men en utveckling sker för att beskriva ytvattenflöden baserat på Navier-Stokes lösningen. Denna nya Navier-Stokes version ska kunna sammankopplas med den traditionella nuvarande versionen av DarcyTools baserad på darcy-flödeslösning så att kopplade grundvatten-ytvattenproblem ska kunna hanteras.

Separat pågår även en utveckling där beskrivningen av ytvattenhydrologin inom nuvarande version av DarcyTools baserad på Darcy-flödeslösning, förbättras. Denna version ska specifikt användas inom projekt SFR-utbyggnad. Under år 2010 kommer de hydrogeologiska modellversionerna 0.2 samt 1.0 att färdigställas. De statistiska fördelningarna för parametrarna som beskriver berggrundens hydrogeologiska egenskaper kommer att bygga framför allt på de platsspecifika data som tagits fram inom projekt SFR-utbyggnad. Med dessa modellversioner som grund kommer det senare att utföras ett antal modelleringsstudier för att bestämma lämplig lokalisering och utformning av en utbyggnad av SFR. I detta projekt kommer det även ske ett antal modelleringsstudier av närområdeshydrologin,

det vill säga mer detaljerat studera flöden i tunnelsystemet för att till exempel titta på egenskaper hos pluggar och fyllnadsmaterial. En viktig komponent vid parameteriseringen av modellerna är kalibrering mot inläckande grundvatten och uppmätta förändringar i grundvattennivå i borrhål i anslutning till den befintliga SFR-anläggningen. Det kommer även att utredas om ventilationsluften från SFR för ut betydelsefulla mängder vatten, som kan påverka kalibreringen av flödesmodellen. I syfte att tillgodose de modelleringsbehov som finns inom projekt SFR-utbyggnad sker även en viss förbättring av aktuell hantering av ytvattenhydrologin inom den nuvarande versionen av DarcyTools.

För ConnectFlow planeras att undersöka förutsättningarna för en utveckling, där en mer formell koppling sker mot geokemiska processer, samt en utveckling av konceptet för diskret spricknätverksmodellering, se avsnitt 25.3.1 I dagens version av ConnectFlow (och även DarcyTools) kan enbart kemiskt konservativa ämnens transport beskrivas, vilket är en begränsning när utvecklingen av grundvattenkemin över långa tidsperioder ska simuleras. Kemiska reaktioner, som är av intresse till exempel för att beräkna redox och pH, kan inte inkorporeras. Detta begränsar vilka kemiska konstituenten som kan användas vid kalibrering eller vid så kallad ”confirmatory testing” som flitigt använts inom platsmodellering. Inom platsmodelleringen gjordes även erfarenheten, att den metodik som använts för att generera stokastiska spricknätverk och parametrera desamma baserat på framför allt data från Posiva-flödesloggning, har begränsningar. Specifikt har metodiken som använts för att ta fram sprickornas storleksfördelningar antagligen överskattat intensiteten och storleksfördelningen av det sammanlänkade (konnekterade) spricknätverket genom en allt för stor korrigerigering (minskning av powerlaw-exponenten) av storleksfördelningen på de vertikala sprickseten. Anledningen till detta är att en för låg Terzaghi-korrektionsfaktor, vid utvärdering av simulerade sprickfrekvenser i ett absolut vertikalt borrhål, medför att den modellerade intensiteten måste ökas över den verkliga, för att man i modellen ska nå upp till de sprickfrekvenser som har uppmätts för vertikala sprickor i inklinerade hål. Detta i kombination med att alla modellerade sprickor, oavsett storlek, antas ha konstanta egenskaper gör att flödeskapaciteten med stor sannolikhet har överskattats. En förutsättningslös genomgång av dessa erfarenheter samt tester av olika framkomliga vägar ska prövas, se även diskussion i avsnitt 25.3.1. En första studie för alternativ parametrering baserat på flödeslogg-data har gjorts i /25-41/.

En viss utveckling kan även förväntas avseende vissa processer såsom flöde i omättade sprickor samt återmättnadsprocesser. Inom Äspö Task Force for Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (TF GWFTS) planeras en ny Task 8, där den hydrauliska interaktionen mellan berg och bentonit vid ett deponeringshål ska studeras. Återmättnadsprocessen är här en central del av frågeställningen. Även effekten av bergspänningar på vattengenomsläppligheten och därmed på förvarets funktion kan komma att studeras med kopplade hydrauliska-mekaniska modeller.

För ökad förståelse för grundvattenströmning under glaciala förhållanden planeras studier inom The Greenland Analogue Project, se avsnitt 19.6, där kopplingen mellan isen, det subglaciala lagret och berget ska konceptualiseras. De experimentella resultat som kommer fram i GAP ska modelleras med DarcyTools. En utveckling av framför allt hantering av permafrost och beskrivning av det subglaciala lagret i DarcyTools förväntas ske inom GAP.

Under kommande period planeras en utveckling av metodik och experiment, samt utvärdering av dessa, som stöd för detaljundersökningsprogrammet, se avsnitt 15.4. Ett projekt är redan igångsatt för att driva dessa frågor. Utvärdering av korrelationen mellan mätbara egenskaper i och grundvattenflödet efter förslutning kommer att ske i samband med detaljundersökningarna och kommer att bygga på resultaten i analysen i /25-21/. Slutsatserna förväntas bli användbara vid en eventuell revidering av konstruktionsförutsättningarna avseende acceptans av deponeringshål.

25.2.4 Gasströmning/gaslösning

Programmet avseende gasströmning/gaslösning sammanfaller med det som beskrivs i avsnitt 25.2.3 om återfukttningsprocesser och specifikt Task 8 inom Äspö Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering (TF GWFTS).

25.2.5 Rörelser i intakt berg

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 redovisades att SKB vidareutvecklat tekniken att karakterisera bergets mekaniska egenskaper och hur tekniken tillämpats i undersökningsområdena Forsmark och Laxemar för att ta fram platsbeskrivande bergmekaniska modeller.

Vid platsundersökningarna hade fram till år 2007 och har även fortsättningsvis omfattande fältinsatser för bergspänningsmätningar genomförts. Överborrningsmätning 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. Det konstaterades dock i Fud-program 2007 att båda metoderna gett en tämligen samstämmig bild av huvudspänningsriktningar ner till nivåer omkring eller något över de studerade djupen för Kärnbränsleförvaret. Spänningsmagnituderna för de båda metoderna visade däremot vissa skillnader.

Resultaten av Apse-försöket i Äspölaboratoriet visade på betydelsen av små mothåll för att stabilisera deponeringshålväggar där den termiskt inducerade ökningen av tangentialspänningarna skulle kunna leda till spjälkningsbrott (spalling) /25-42, 25-43/.

SKI instämde med SKB i antagandet att om deponeringstunnlar orienteras parallellt med största huvudspänningsriktningen så är risken för spjälkning under byggskedet mindre än för orientering i andra riktningar. SKI framhöll att det finns underlag /25-44/ som indikerar att spjälkbrott kan inträffa vid lägre spänningar (ytligare) än vad SKB anger i sin rapport om spjälkning /25-45/. SKI framhöll vidare att svälltrycket från bentoniten kan bromsa utvecklingen av bergutfall (breakouts), men att detta dock kan leda till sprickinitiering och ökad spricklängd för tensionssprickor i största huvudspänningsriktningen. Man önskar att SKB studerar denna process vidare.

Kärnavfallsrådet ansåg att generella studier bör genomföras avseende vilken effekt rådande och förändrade bergspänningar kan ha på vattengenomsläppligheten i sprickor i olika riktningar och därmed konsekvenserna för detaljdesignen av förvaret. Vidare ansåg Kärnavfallsrådet att kopplade frågeställningar om förändringar vid öppet förvar bör utredas när det gäller integrationen mellan ändrade bergspänningsförhållanden, grundvattenförande zoner och eventuell påverkan av grundvattenkemi.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Ett projekt med inriktning speciellt mot att närmare undersöka mothållseffekten har genomförts i form av ett fältexperiment i ett antal borrhål med cirka 500 millimeters diameter. Fältförsöket Caps (Counterpressure Applied to Prevent Spalling) använde lecakulor för att simulera mothållande effekt av icke-vattenmättade pellets av bentonit. Försöken tyder på att det lilla mothållande tryck som lecakulorna ger upphov till är tillräckligt för att begränsa spjälkningen och förhindra uppkomsten av en starkt genomsläpplig zon av uppsprucket berg i de aktuella 500-millimeterhålen /25-46/.

Ett program har även genomförts inom ramen för platsundersökningarna för att med hjälp av triaxiell belastning och mikroskopi-studier kvantifiera graden av spänningsinducerade mikrosprickor i borrhåll från några djup från både Forsmark och Laxemar.

Program

SKB kommer i första hand att följa och medverka i utvecklingsarbetet om spjälkning inom ramen för det så kallade POSE-projektet som drivs av Posiva. Slutsatserna från SR-Site om betydelsen av den termiskt inducerade spjälkningen för den långsiktiga säkerheten kommer även att ha betydelse för ambitionsnivån för den fortsatta forskningen. I nuläget bedöms denna spjälkning endast ha begränsad betydelse för säkerheten.

25.2.6 Termisk rörelse

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 redovisades resultat angående termiskt inducerad spjälkning vilka togs fram med hjälp av data från Apse-försöket, se avsnitt 25.2.5.

SKI instämde med SKB om att Apse-experimentet vid Äspö har gett SKB ny kunskap om spjälkning i deponeringshål med trovärdiga slutsatser om bergets egenskaper då det utsätts för termomekanisk belastning. SKI ansåg dock att det finns en risk för att såväl kortare som längre sprickor i omgivande berg runt ett kapselhål, genom termomekanisk belastning kan börja propagera från en sprickända och förenas med andra sprickor. Detta kan i sin tur medföra ökning av grundvattenflödet runt deponeringstunnel och deponeringshål.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Den analytiska termomekaniska lösningen för KBS-3-förvaret som presenterades i /25-47/ har vidareutvecklats så att man kan analysera fall med flera olika deponeringsområden. De ursprungliga ekvationerna har kodats till lätt användbara matematiska kalkylblad och har tillämpats vid känslighetsanalyser och vid analyser av hur deponeringssekvensen kan inverka på närfältsutvecklingen /25-12/. Till exempel har man nu verifierat att den approximation som vanligen görs vid analyser av närfältets termomekaniska utveckling, nämligen att alla kapslar deponeras samtidigt, är giltig förutsatt att inte tidsförskjutningen mellan berguttag/deponering i närliggande tunnlar blir stor. Med hjälp av denna analytiska lösning kan man lätt kontrollera att approximationen håller för en given föreslagna deponeringssekvens. Den analytiska lösningen som sådan är verifierad tidigare /25-48/. Den omkodade versionen har verifierats genom jämförelse med numeriskt erhållna resultat /25-12/.

Den termomekaniska utvecklingen i Prototypförvaret analyseras för närvarande med en metod liknande den som tidigare tillämpats för Apse-försöket /25-49/. Analysen baseras på den verifierade termiska analys som nu finns, det vill säga med noggrann beskrivning av hur effekten i de olika kapslarna varierar. Sammanställningsarbetet pågår, men analysen visar preliminärt att tangentialspänningarna i deponeringshålen inte når upp till den nominella spjälkningshållfastheten. Man kan därför inte förvänta sig att kunna dra några viktiga slutsatser angående spjälkning och effekter av mothåll från Prototypförvaret.

Det möjliga tryckberoendet hos den termiska expansionskoefficienten hos typiska bergarter i förvarsberget kartläggs för närvarande genom en litteraturstudie. Avsikten är att bedöma risken för att termospänningarna i förvaret underskattas, på grund av att parametervärden bestämts genom försök på obelastade prover. Litteraturstudien visar preliminärt att detta inte är fallet. För att en sådan underskattning ska vara möjlig måste man göra extrema antaganden beträffande anisotropin i bergprovernas mikroporositet.

Program

Generell utveckling av koder för modellering kommer att ske för att bland annat öka förståelsen av storskaliga termo-mekaniska processer, se vidare avsnitt 25.3.2. Nuvarande kunskap bedöms dock tillräcklig för att kunna gränssätta betydelsen av den termiskt inducerade rörelsen för den långsiktiga säkerheten.

25.2.7 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor

Rörelse längs befintliga sprickor relaterar till strukturgeologi och tektonik, det vill säga huvudsakligen frågeställningar om jordskalvspåverkan och effekter av så kallade postglaciala förkastningar.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs analyser, som genomförts med den distinkta elementkoden 3DEC /25-50/, av jordskalv på förvaret. Två olika skalvgeometrier analyserades: en där skalvet når en kilometer under markytan och en där skalvet bryter genom markytan. I båda fallen var skalvet av magnitud sex. Syftet med studien var att bestämma storleken av de sekundära skjuvrörelser som kan induceras i sprickor på olika avstånd från ett skalv. Den möjliga skjuvrörelsen hos vissa sprickor 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 långa sprickor. Analysen visade att den maximala beräknade skjuvrörelsen hos sprickor på 200, 600 och 1 000 meters avstånd från skalvet, med god marginal ligger under kapselskadekriteriet (100 millimeter). Resultaten – det vill säga avståndsbegränsningarna och sprickstorleksreglerna – bedömdes som giltiga också för större skalv, till exempel skalv av magnitud sju.

För att, bland annat, kunna tillämpa slutsatserna i /25-50/ inleddes ett övergripande struktur-geologiskt karakteriseringsprojekt med fokus på att kvantifiera förekomsten och utsträckningen av sprickor och smärre deformationszoner i storleksordningen 100–500 meter /25-51/. Arbetet diskuterar även olika metoder att uppskatta strukturernas läge och storlek under olika undersöknings- och konstruktionsskeden för ett slutförvar. Inom projektets ram togs även fram en metodik för att kartlägga sprickor /25-52, 25-53/ som bygger på sprickkartering i tunnlar och tillämpning av DFN-modellering.

Uppsala universitet hade på uppdrag av SKB genomfört två studier som beskriver olika mekaniska effekter i jordskorpan av en glaciation liknande Weichselglaciationen /25-54, 25-55/. Båda studierna byggde på numerisk tvådimensionell modellering med finita elementkoden Abaqus. Den första studien avsåg skorpan stabilitet och förutsättningarna för skalv under tiden för isens avsmältning och tillbakadragning. Den andra studien avsåg spänningsutvecklingen på 500 meters djup i Forsmark och Laxemar och genomfördes med mer utvecklade jordskorpemodeller och för två antaganden beträffande Weichselglaciationens utveckling i tiden.

En studie som utnyttjade metoden ”Differential SAR Interferometry” (dInSAR) visade att inga rörelser under den studerade perioden hade kunnat observeras i något regionalt lineament eller i någon sprickzon i Forsmarksområdet /25-56/. Däremot identifierades ett flertal lokala sättningar i lösa sediment.

SKI saknade i Fud-program 2007 generellt studier gällande hållfasthet och deformation av stora sprickor och sprickzoner, som man anser angelägna mot bakgrund av regionala och lokala modelleringar som behövs för analys av spänningstillstånd och frågor kring kopplade processer. SKI ansåg också att SKB i framtiden, i större utsträckning bör redovisa känslighetsanalyser gällande utförd modellering där sprickor och sprickzoners mekaniska egenskaper varierar. Vidare så önskade SKI ytterligare och fördjupade studier om att förvaret i sig eventuellt skulle komma att utgöra ett svaghetsplan och därmed vara en brottanvisning i samband med framtida jordskalv.

SKI och SSI ansåg att SKB har ett bra angreppssätt för hanteringen av jordskalvsproblematiken i SR-Can. SKB utgick där från en uppskattad årlig sannolikhet för skalv av magnitud sex eller större. Myndigheterna bedömde dock att analysen i SR-Can har baserats på ett antal otillräckligt motiverade antaganden, vilket behöver ses över inför SR-Site. Det saknades till exempel en utförlig diskussion om säkerhetsbetydelsen av upprepade skalv med små magnituder.

SSI ansåg liksom SKI att SKB, utifrån en samlad problembeskrivning, bör härleda och redovisa ett program för: fortsatt arbete som belyser utveckling av modeller för att bedöma effekterna av ett jordskalv av magnitud sex eller större, metoder för identifiering av sprickor och deformationszoner, ytterligare arbete med diskreta nätverksmodeller, samt utveckling av respektavstånd och kriterier för val av deponeringspositioner.

Kärnavfallsrådet ansåg att SKB bör genomföra mätningar av eventuella berg rörelser på den utvalda kärnbränsleförvarsplatsen under perioden för behandlingen av platsansökan och sedan en längre tid under byggande och drift av förvaret.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Arbetet med att utveckla och analysera modeller av jordskorpan stabilitetsförhållanden och spänningsutveckling under en glaciationscykel har fortsatt, främst inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Site. De modeller som analyserats tidigare har varit tvådimensionella och byggt på förenklade antaganden. En tredimensionell situation har nu analyserats genom ett omfattande modelleringsarbete med datorkoden Abaqus. Det övergripande målet har varit att ta fram randvillkor i ett regionalt perspektiv för bergspänningsutvecklingen i Laxemar och Forsmark under en glaciationscykel. Vidare har också stabiliteten hos förkastningar i Laxemar och Forsmark analyserats under förutsättning av seismogeniskt djup av 9,5 kilometer /25-57/.

En studie av potentialen för hydraulisk uppspräckning (på engelska ”jacking”) i samband med en glaciation har genomförts /25-58/. Hydraulisk uppspräckning sker när portrycket i en spricka blir så stort att sprickans draghållfasthet överskrids och sprickaperturen ökar kraftigt med svårberäknade följder för transmissivitet och flöde. Ett antal olika omständigheter, vilka teoretiskt skulle kunna leda

till att höga vattentryck som genereras under isen och kan påverka trycksituationen också utanför isen har identifierats. Den hydrauliska spräckningen bedöms dock inte kunna nå djup under cirka 250 meter.

En utvidgad numerisk analys av effekterna av jordskalv på förvarsbergets sprickor har genomförts. Principerna för analysen är i allt väsentligt de som också användes för SR-Can /25-50/. Slutsatserna redovisas inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Site.

Huvudsyftet med jordskalvssimuleringarna har som tidigare (se till exempel /25-59, 25-50/) varit att ta fram relevanta uppskattningar av de sekundära rörelser som kan induceras i målsprickorna i närheten av en den aktiva jordskalvszonen.

För att bedöma transmissivitetsförändringar hos sprickorna i närområdet vid bygge, termisk last och under en glaciationscykel har termomekaniska närfältsmodeller /25-60/ utvecklats för i överensstämmelse med de uppdaterade layout- och platsbeskrivningarna /25-12/. För utvecklingen under glaciationscykeln används spänningsdata som tagits fram med nya tredimensionella analyser av den senaste glaciationen /25-57/. En mer realistisk spännings-transmissivitetsmodell har tagits fram. Kvalitativt skiljer sig den uppdaterade modellen inte från den som användes i SR-Can-analyserna, det vill säga transmissiviteten hos en spricka har samma typ av exponentiella beroende på den effektiva normalspänningen. Modellens parametervärden har däremot bestämts från resultat av mätningar av sprickstyvhetsens normalspänningberoende hos sprickprover från Forsmark. Mätningarna är utförda som cykliska belastningsförsök /25-61/. För utvärderingen har resultat från den andra lastcykeln använts, då den första lastcykeln kan antas vara störd av provtagning, montering med mera.

En litteraturstudie /25-62/ har genomförts för att få bättre perspektiv på giltigheten av sambandet mellan spänning och transmissivitet som använts i modellen /25-12/. Resultatet kan sammanfattas som att modellen i princip är riktig, men att osäkerheterna är stora, bland annat därför att det finns mycket få dokumenterade och relevanta fältexperiment som kan användas för kontroll. I de fältförsök som ändå finns är variationerna stora. I tillämpningen /25-12/ används därför två uppsättningar av parametervärden: en för en förväntad genomsnittspåverkan av transmissiviteterna och en som ger en bedömd maximal påverkan.

De deformationszoner som finns i och omkring deponeringsområdena kommer att påverka närfältets termiska volymexpansion och därmed termospänningarna runt deponeringshål och deponeringstunnlar. För att gränssätta denna inverkan har storskaliga 3DEC-modeller av platserna analyserats /25-12/. Resultat från de storskaliga 3DEC-modellerna, som inkluderar en representativ uppsättning mindre deformationszoner inne i förvaret, används sedan för att ta fram tidsberoende randvillkor (först expansion, sedan kontraktion) till närfältsmodeller av olika delar av förvaret. Också inverkan av stora deformationszoner på lite större avstånd analyseras på samma sätt. Resultaten visar att såväl de få deformationszonerna inne i förvaret som en enstaka större zon på ett lite större avstånd har en försumbar inverkan. I den modellering av närfältet som görs för att kvantifiera potentialen för termiskt inducerad spjälkning, ignoreras därför deformationszonernas inverkan.

En stabilitetsanalys av ett plan med en uppsättning tunnlar med dimensioner liknande KBS-3:s deponeringstunnlar har genomförts /25-63/. Analysen har gjorts med den tvådimensionella distinkta elementkoden UDEC. Planets stabilitet har analyserats för olika antaganden om framtida laster, dels predikterade troliga laster, dels rent hypotetiska extrema laster. För den termiska lasten under den tempererade perioden är horisontella plan genom förvaret i princip huvudspänningsplan, det vill säga inga skjuvspänningar verkar. Vertikalspänningen mellan och intill tunnlar är under hela den termiska perioden tillräckligt höga för att de svaghetsanvisningar som eventuellt kan finnas, föreligger i hög kompression. Det finns alltså inga indikationer på att den lokala expansion som finns runt tunnlar i början av den termiska fasen skulle kunna bidra till en horisontell uppspräckning mellan tunnlar. För hypotetiska lastfall med stora skjuvspänningar i horisontalplanet visar UDEC-modellerna att stabilitetsmarginalen knappast påverkas av tunnlar. För att tunnlar ska påverka mer än marginellt, måste tunnelavstånden vara små; i storleksordningen 15–20 meter. En annan hypotetisk process är bildandet av så kallade bankningssprickor, som följd av stora horisontalspänningstillskott i bergpartier med konvex yttlig topografi. Med de bergegenskaper som gäller för Forsmark kan man inte generera vertikala dragspänningar på större djup än cirka 100 meter i UDEC-modeller med konvex topografi, även om modellen komprimeras så kraftigt att horisontalspänningarna växer med 40 megapascal. På förvarsdjup visar analysen att vertikalspänningen är till-

räcklig för att horisontella sprickplan med god marginal ska vara i kompression, även om man antar att portrycket är förhöjt på grund av kvardröjande effekter av ett smältande istäcke. Eftersom den vertikala effektivspänningen på förvarsdjup alltså är kompressiv också under förhållanden som ger bankningsprickor på mindre djup, kan det inte bli någon horisontell uppsprickning i förvarsplanet, vare sig med eller utan tunnlar. I samband med jordskalv kan det teoretiskt sett ske en uppsprickning i horisontella plan på förvarsdjup i områden med stora spänningskoncentrationer vid kanten av den aktiva skalvzonen. Med stor sannolikhet är detta en effekt av att brottpropagering i den aktiva zonen fångas upp abrupt av det omgivande elastiska kontinuumet i den dynamiska modellen som används för att ta fram spänningsutvecklingen på planet. Stabilitetsförlusten är dock i det närmaste oberoende av förvarets hålrum. Sammanfattningsvis visar analysen i /25-63/ att förvaret inte kommer att fungera som ett svaghetsplan.

Program

Inom ramen för detaljundersökningsprogrammet behandlas tektoniska och byggrelaterade aspekter av berget i kapselhåls- och deponeringstunnelskala, se avsnitt 15.4. Kunskapsnivån angående betydelsen av framtida jordskalv bedöms nu vara tillräcklig för säkerhetsanalysen SR-Site, men för att ytterligare öka kunskapsläget samt bättre kvantifiera kvarvarande osäkerheter planeras fortsatta forskningsinsatser inom strukturgeologi, seismologi och tektonik enligt nedanstående program.

SKB planerar att öka kunskaperna om spänningstillståndet på djup större än en kilometer i den svenska jordskorpan. Kunskap om spänningsfältet är en grundläggande komponent i all förståelse av dynamiska processer i jordskorpan, och i allra högsta grad för modeller av mekanismerna som genererar jordskalv, postglaciala såväl som i dag. Det behövs en uppdatering, state-of-the-art-beskrivning baserat på djupa borrhål, jordskalvsmekanismer, deformationsdata (GPS), skorpan seismiska struktur samt en utvärdering av spänningsmodeller från topografi, den senaste nedisningen, plattetektonik. Vidare ska modeller för spänningsutvecklingen på djupet i litosfären analyseras. Studien ska beakta hur spänningsfältet maximalt kan variera i rummet, något som är av största betydelse för spänningskoncentration och därmed stora jordskalv, inklusive för uppskattningar av den maximala storleken av ett jordskalv. Detta bör göras både genom teoretiska/numeriska modeller och med data från områden i världen som är mer aktiva än Sverige i dag.

Det nationella digitala seismiska nätet har nu varit i drift i cirka tio år. Databasen omfattar drygt 3 200 jordskalv. Skalven har analyserats var för sig, men någon samlad analys har ännu inte gjorts. En samlad analys (så kallad multi-event analys) skulle sannolikt ge en bättre säkerhet i lokaliseringarna, framför allt vad gäller djupbestämningar. Vidare skulle en sådan tolkningsmetodik av jordskalven ge en förfinad hastighetsstruktur i 3D, som återkopplar till lokaliseringarna och öka förståelsen av mer koherenta jordskalvmekanismer och hur skalven eventuellt följer strukturer nere i jordskorpan. Tolkningsmetodiken ska även öka förståelsen om hur dagens storskaliga bergspänning ser ut.

Tredimensionell (3D) bestämning av hastighetsstrukturen i ett område kan i dag göras med så kallad jordskalvs-tomografi. Vid tillämpning av nano- eller mikro-seismisk monitorering av Kärnbränsleförvaret, är det av stor vikt att ha en så noggrann bild som möjligt av den seismiska hastighetsstrukturen för att korrekt kunna lokalisera (inducerade) jordskalv (se även planer för monitorering i avsnitt 15.4). Den seismiska hastigheten påverkas av tidsvariationer i tillståndsvariabler såsom tryck, temperatur och portryck. Man kan med upprepade tomografistudier (4D) ge en bild av tillståndsutvecklingen i en föränderlig bergmassa. Metoderna behöver dock förfinas för att ge bättre upplösning, vilket kan göras genom att använda mer av vågformen än bara de första ankomsterna, så kallade vågformstekniker. Sådan metodutveckling och tillämpning avses bli testad i en gruvmiljö, eller eventuellt i samband med utbyggnad av Äspölaboratoriet.

Uppskattningar av de spänningar som orsakade de stora postglaciala förkastningarna i norra Fennoskandia kräver kunskap om skalvplanens geometri. På Pärvieförkastningen pågår undersökningar av mikroskalv för att se om dessa definierar ett större skalvplan under tre kilometers djup. Seismiciteten på Pärvie är dock relativt låg, vilket gör analysen besvärlig. Skellefteåområdet har den högsta seismiska aktiviteten i Sverige och skalven verkar ligga längs en av de två postglaciala förkastningar som identifierats där. SKB överväger att utvidga programmet genom att förtäta ett seismiskt nätverk i området, vilket förväntas resultera i närmare 1 000 välbestämda jordskalv. Detta skulle ge information om förkastningens geometri, spänningstillstånd och de mekanismer som

driver skalvaktiviteten i dag. Med både Pärvie- och Skellefteåförkastningarna noggrant undersökta, är avsikten att vi bättre ska kunna utvärdera hur skalvaktiviteten på en presumtiv postglacial förkastning i andra delar av landet bör se ut.

För att utöka informationen om sentida rörelser på de postglaciala förkastningarna, planeras studier av Pärvieförkastningen med hjälp av modern satellitradarteknik (dInSAR). Med denna metod kan markrörelser längs förkastningarna analyseras på ett sätt som täcker in ett mycket större område än enstaka GPS-mätningar. Med modern tolkningsmetodik som utnyttjar stora mängder data under många år bör även små förkastningsrörelser kunna identifieras.

I detta sammanhang kan nämnas att flera svenska universitet med Lunds universitet som huvudman har beviljats medel av Vetenskapsrådet (VR) för anskaffning av en borrhigg med möjligheten att kunna genomföra olika typer av vetenskapliga undersökningar av förhållanden ned till cirka tre kilometer i det Fennoskandiska sköldområdet. Borrhiggen blir en central resurs inom det svenska kontinentalborrningsprogrammet (Swedish Deep Drilling Program, SDDP). Flera borrhjuggprojekt för riggen är i planeringsfas och de berör bland annat strukturgeologi, seismologi och tektonik men även hydrogeologiska, termiska och hydrogeokemiska aktiviteter är planerade. SKB avser att engagera sig i SDDP i tillämpliga delar när det gäller allmän geovetenskaplig kunskapsuppbyggnad av förhållandena i det svenska urberget.

Kopplat till SDDP och det internationella kontinentalborrningsprogrammet ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) pågår för närvarande ett förberedelsearbete att borra undersökningshål i anslutning till postglaciala förkastningar (till exempel Pärvieförkastningen).

SKB har för avsikt att engagera sig i initiativet PFDP (the Postglacial Fault Drilling Project) som planeras ingå i SDDP och omfattar allmän kunskapsuppbyggnad om postglaciala förkastningar i norra Skandinavien. Såväl djupa kärnborrhål (cirka 1 000 meter) som någon enstaka borrhugg till 3 000 meter med den ovan nämnda SDDP-riggen är planerade. SKB kan med sina erfarenheter, från platsundersökningarna och borrhuggen KLX02 till 1 700 meters djup, bidra med borrhuggs- och undersökningstekniska råd jämte kvalitetssäkrad hantering av undersökningar och stora databaser.

Deformationsmätningarna med GPS-teknik (Global Positioning System) initierades i Forsmarksområdet år 2005 och fortsätter. Målet med studien är att erhålla ytterligare erfarenheter av tekniken med fasta GPS-stationer och kartlägga eventuella pågående berggrundsrorelser (främst horisontella) utmed de mest framträdande regionala deformationszonerna Singözonen och Forsmarkszonen. Rådata är inte ännu analyserade ur ett tektoniskt perspektiv.

25.2.8 Sprickbildning

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 refererades till Apse-försöket i Äspölaboratoriet och till övriga aktiviteter om frågeställningar som behandlar intakt berg. När det gäller säkerhetsanalytiska aspekter på den störda zonen (EDZ) så hade de behandlats inom ramen för SR-Can. Enligt SR-Can innebär en störd zon med en och en halv storleksordnings högre konduktivitet än omgivande berggrund, inga säkerhetsmässiga problem. En grundläggande förutsättning är emellertid att tunneldrivningen sker enligt kvalitetssäkrad praxis med försiktig sprängning.

SKI ansåg i granskningen av Fud-program 2007 att SKB behöver vidareutveckla metodik som visar på eventuell existens av flödesvägar i störda zonen längs med en sprängd tunnels utsträckning. Kärnavfallsrådet hade en liknande kommentar och önskade en bättre redovisning av den så kallade störda zonen utbredning och egenskaper vid försiktig sprängning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

SKB har varit involverat i flera projekt som behandlat egenskaper i och säkerhetsanalytiska aspekter på den störda zonen (EDZ). Bland dessa kan nämnas THM-modellering inom ramen för det internationella programmet Decovalex och ett riktat program med flera delprojekt, ”Störda Zonen mekaniska and hydroUliSka Egenskaper” (ZUSE) /25-64, 25-65, 25-66, 25-67, 25-68, 25-69, 25-33/. En redovisning om kunskapsläget angående EDZ-frågor finns i kapitel 15.

Program

Mätdata från Prototypförvaret i Äspö laboratoriet (akustisk emissionsdata, spänningsmätningar, termiska data) ska utvärderas tillsammans med resultat från termo-mekaniska beräkningar för att undersöka i vilken omfattning sprickpropagering kan ske kring ett deponeringshål. För de termo-mekaniska beräkningarna föreslås modellering av de termiska egenskaperna via en inversmodellering baserad på temperaturdata där man först genomför en konditionerad stokastisk modellering av bergmassan och dess termiska egenskaper. Detta ger en spatial fördelning av de termiska egenskaperna i Prototyp-tunneln. Prototypförvaret kommer att öppnas år 2011.

Frågeställningar om störda och/eller skadade zonens utbredning runt en tunnel kommer fortsättningsvis att hanteras inom ramen för den så kallade Berglinjens huvudaktiviteter och detaljundersökningsprogrammet, se avsnitt 15.4.

25.2.9 Tidsberoende deformationer

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 konstaterades att man kan förutsätta att förhållandet mellan spänning och hållfasthet måste överstiga vissa tröskelvärden för att någon krypning alls ska ske /25-70/.

SKI noterade att SKB hörsammat önskemålet att etablera ett särskilt program inriktat på tidsberoende deformation och sprickdynamik och då särskilt termiskt inducerade mikrosprickor och tidsberoende processer som subkritisk sprickbildning och kryp.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Tidsberoende deformationer kopplar mot sprickdynamiska begrepp i allmänhet. På uppdrag av SKB har en samordnad utredning sammanställts som behandlar mikrosprickors uppträdande, subkritisk sprickbildning och krypning /25-71/. Den mekaniska responsen hos ett kristallint berg med hänsyn till en mycket långvarig kompressionslast är av intresse för ett slutförvar som ska kunna vara isolerat från biosfären under långa tidsrymder. Den övergripande frågeställningen är om hållfastheten minskar gränslöst, eller om det existerar ett lägsta tröskelvärde på hållfastheten under vilket berget upphör att deformeras. Utredningsarbetet har varit baserat på tolkning av resultat från korttidsprovning av krypning i bergprover, numeriska modellanalyser av effekten av minskad sprickrähet på grund av spänningskorrosion av bergets hållfasthet, belägg från plattetektoniska processer och observationer av bergspänningar i bergtäkter.

Publikationens slutsatser är sammanfattningsvis:

- En spänningströskel, det vill säga en deviatorisk spänning som kan bäras obegränsat, existerar för kristallina bergarter. Denna tröskel är sannolikt en signifikant andel av den sprickinitierade spänningen (det vill säga 40–60 procent av enaxlig tryckhållfasthet).
- Exponentiell extrapolation av korttidsprovningens resultat för krypning innebär en realistisk tidsberoende hållfasthet motsvarande en ”flytande spänningsrelation” (på engelska: Driving Stress Ratio) av cirka 0,45. Linjär extrapolation till en slutgiltig nollhållfasthet är totalt obefogat att tänka sig /25-72/.

Baserat på denna publikation drar SKB slutsatsen att tidsberoende deformationer av berget kan avfärdas som en process av betydelse för den långsiktiga säkerheten.

Program

För utveckling av transient bergmekanisk modellering hänvisas till avsnitt 25.3.2.

25.2.10 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 25.2.11 behandlas betydelsen av advektion och dispersion för radionuklidtransport.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades verifiering av den uppdaterade koden M3, samt beräkningar av salthaltens utveckling vid klimatförändringar.

I granskningen ser SKI positivt på att SKB:s planer. Samtidigt efterfrågar de en utredning hur advektion och blandning påverkar transport av korroderande ämnen till förvaret, speciellt sulfid, metan, syre och organiskt material. Denna fråga tas upp i avsnitt 25.2.11.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

De nya data som har kommit fram inom platsundersökningsprogrammet har analyserats och platsmodeller har tagits fram /25-73, 25-74/. Dessa modeller har utnyttjat både grundvattenkemi och hydrogeologiska data, samt vår kunskap om paleohistorien vid platserna. Osäkerheterna i blandningsmodellerna har undersökts /25-75, 25-76, 25-77, 25-78/. Modellerna kommer att användas inom säkerhetsanalysen SR-Site för att i detalj modellera grundvattenkemin under den tempererade perioden som följer på slutförvarets förslutning. Liknande beräkningar utfördes för SR-Can /25-79, 25-80, 25-81/.

Datorkoden M3 /25-82/, som används för statistisk bearbetning med så kallad multivariatanalys, har utvecklats med stöd av SKB. Programmet har uppdaterats och verifierats /25-83, 25-84, 25-85/.

Program

Utvecklingen av modeller i vilka advektions- och blandningsprocesser ingår beskrivs i avsnitt 25.3.3. Beräkningar av salthaltsutvecklingen vid omfattande klimatförändringar över långa tidsintervall kommer att rapporteras inom ramen för SR-Site. Data och modeller för transport av ämnen som metan och syre kommer också att rapporteras inom SR-Site.

För att kunna studera effekterna från blandning och reaktioner i detalj planerar man att installera fasta grundvattenstationer och att använda nya provtagningsmetoder på Äspö. Syftet är att undersöka de förändringar i tid och rum som har att göra med ett stort hydrogeokemiskt och hydrogeologiskt tunnelsystem, analogt med byggandet av slutförvar och när förvaret står öppet. Effekterna på vattensammansättning, Eh, pH, gas, mikrober och kolloider kommer då att kunna studeras i samband med blandningsprocesser i Äspös tunnelsystem, där ytvatten eller havsvatten möter djupare vatten.

25.2.11 Advektion/blandning – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerade SKB att utvärdera behovet av detaljstudier av advektion i enskilda sprickor, för modellering med Darcy Tools. En utvärdering av skillnaden mellan modeller som bygger på dispersion snarare än blandning identifierades också som ett möjligt behov.

SKI såg positivt på SKB:s planer på att utvärdera skillnaden mellan blandning och dispersion i flödesmodellerna. Vidare ansåg man att SKB bör visa att modellerna för icke-reaktiv transport som används för att förklara geokemin, exempelvis beräkningar av utvecklingen av salthalten av grundvattnet, stämmer överens med modellerna som används för radionuklidtransportberäkningarna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

De planerade simuleringarna av flöde i en enskild spricka med DarcyTools Navier-Stokes version har blivit senarelagda och behandlas i stycket Program nedan. En genomgång av orsaker till kanalbildning och dess effekter har dock gjorts i /25-86/. Advektiv transport i tvådimensionella spricknätverk har studerats i /25-87/.

Program

Kanalbildning, så kallad channeling, av grundvattenflödet kan uppstå på grund av rumslig variabilitet av en sprickas apertur, samt på grund av hur sprickorna är kopplade till varandra i en nätverksstruktur. Även de hydrauliska randvillkoren påverkar kanalbildningen. Kanalbildning kan påverka

flödesrelaterade transportparametrar såsom advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd (F). I säkerhetsanalysen reduceras F brukligt (med en faktor 10 i SR-Can) för att beakta att homogena sprickor använts i flödessimuleringarna. Tidigare mer detaljerade analyser /25-88/ visar dock att detta angreppssätt är väl konservativt.

Simulering av flöde och transport i enskilda sprickplan med variabel apertur planeras. Både den tilltänkta Navier-Stokes versionen av DarcyTools och eventuellt andra modeller kommer att användas. Studier pågår och ytterligare studier planeras för att analysera hur den stagnanta vattenvolym som uppkommer vid kanalbildning påverkar diffusionen av transporterade ämnen från det mobila vattnet till den intilliggande immobila vattenfasen samt vidare in i matrisen. Lösningar för detta problem har tagits fram tidigare /25-89/ och har även analyserats som en del av platsmodelleringen /25-86/ och inom SR-Site. Resultaten av analysen inom SR-Site indikerar att det inte finns anledning att reducera F. Den minskade flödesväta yta som kanalbildningen ger upphov till kompenseras av den ytterligare yta som blir tillgänglig vid de stagnanta delarna av sprickplanet. Efter SR-Site ska ytterligare, mer systematiska simuleringar, med användning av de metoder som finns framme, utföras för att komma fram till en mer generell strategi för hur kanalbildning bör hanteras i olika applikationer.

I programmet ingår även simulering av flöde och transport i enskilda sprickplan med variabel apertur planeras. Både den tilltänkta Navier-Stokes versionen av DarcyTools och eventuellt andra modeller kommer att användas.

Inom ramen för SR-Site analyseras frågan om hur advektion påverkar transporten av korroderande ämnen, såsom metan, syre och organiskt material, till förvaret /25-22/. Frågan om skillnaden mellan blandning och dispersion i flödesmodellerna utreds också inom SR-Site där effekten av dispersion på utspädning och resulterande radionuklidtransport analyseras med hjälp av koden Marfa.

Ett projekt planeras som ska utreda vilka olika typer av porositet (sprickaperturer) som används (olika conceptualiseringar), samt hur dessa mäts och används inom olika applikationer. Studier under de senaste 15 åren (till exempel True-försöken i Äspölaboratoriet) har resulterat i en förbättrad konceptuell beskrivning och kvantifiering. Vad som dock saknas är en samlad integrerad beskrivning som spänner över aktuella relevanta skalor och förenar utnyttjade begrepp inom flera ämnesområden. Det planerade projektet har koppling mot flera andra processer än advektion (specifikt diffusion) eftersom, beroende på vilken typ av process som studeras så involveras porositet i olika skalor. Olika porositeter uppträder från matrisbergets enskilda porer (matrisdiffusion, matrisporvatten), via porositeten hos enskilda sprickor med dess fyllnadsmaterial (in situ-spårförsök), till porositeten hos större konduktiva deformationszoner och bergets storskaliga bulkporositet (regional flödesmodellering, partikelspårning, paleohydrogeokemi etc).

25.2.12 Diffusion – grundvattenkemi

Detta avsnitt handlar om effekter av molekylär diffusion av grundvattenkomponenter. Betydelsen för nuklidtransport behandlas i nästa avsnitt. Diffusion av grundvattnets gaskomponenter redovisas i ett senare avsnitt.

Interaktionen mellan bergmatrisens porvatten och grundvattnet i sprickorna sker huvudsakligen genom diffusion. Kemiska reaktioner sker framför allt med sprickfyllnadsmineral, även om reaktioner med bergmatrisens primära mineral på lång sikt kan få en ökad betydelse för grundvattnets kemi.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Studier av matrisporvatten i Äspölaboratoriet (Matrisförsöket) visade att det inte finns någon anledning att misstänka att det finns matrisporvatten med hög salthalt vid förvarsdjup i en miljö liknande Äspö /25-90/. Erfarenheterna från Matrisförsöket användes sedan inom platsundersökningarna. Provtagningen och analysteknikerna utvecklades vidare /25-91, 25-92/.

SKI anser i sin granskning att SKB bör utreda grundvattenskiktningens utveckling över tiden. I granskningen stödjer man SKB:s planer på fortsatta undersökningar av matrisvatten. De anser dock att planerna saknar studier om hur kemiska reaktioner i bergmatrisen påverkar radionuklidtransporten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Undersökningarna av Forsmark och Laxemar har i allmänhet bekräftat den gängse hydrogeokemiska kunskapen /25-73, 25-74/. Nya matrisporvattendata har kommit fram /25-93, 25-94, 25-95/. Man har identifierat porvattnen av postglacialt ursprung i de översta 500–600 meter av bergmatrisen och ackumuleringen av glacialt smältvatten genom diffusion under senaste glaciala reträtten. I vissa lägen, nära till konduktiva sprickzoner tyder porvattnets sammansättning på en del indiffusion av havsvatten efter senaste istiden. Ett porvatten av varmare meteoriskt ursprung har också identifierats. Åldern för denna komponent är okänd, men måste ha sitt ursprung före den senaste glaciala cykeln. Dessa porvatten har kunnat bevaras orörda under långa tidsperioder beroende på en låg sprickfrekvens. Därför fungerar dessa porvatten som ett arkiv för paleohydrogeologin, och hjälper till att tolka omständigheterna kring Östersjöns utveckling och dennas påverkan på de kustnära platserna. Trenderna förekommer i varierande grad i både Laxemar och Forsmark, de största skillnaderna är placeringen av de olika porvattentyper vilket återspeglar de olika hydrauliska egenskaperna.

Studierna har också tillåtit tolkning av diffusionsegenskaper för huvudbergstyperna. Resultaten visar att transport av lösta ämnen i bergmatrisen styrs av diffusion och att matrisdiffusion sker över sträckor om flera tiotalsmeter. Även om datamängden hittills är begränsad, stödjer dessa preliminära iakttagelser modellerna för radionuklidtransportberäkningar i säkerhetsanalyserna.

Program

Det finns inga omedelbara planer för ytterligare omfattande analyser av matrisporvatten. SKB planerar däremot några laboratorie- och modelleringsstudier för att ytterligare förbättra analystekniken och tolkningen av befintliga data. Detta område bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

25.2.13 Diffusion – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Programmet som presenterades i Fud-program 2007 innefattade analyser och slutrapportering inom projektet Long Term Diffusion Experiment Sorption-Diffusion (LTDE-SD) i Äspölaboratoriet. Diffusionsförsök i laboratorium på LTDE-SD-material planerades också för att kunna jämföra resultaten i LTDE-SD med resultat från platsundersökningarna.

I granskningen anser SKI att SKB bör hantera frågor kring in situ-mätningar för elektrisk resistivitet och kompletterande laboriemätningar. Det behöver visas att mätningarna återspeglar diffusion av joner i porvatten och inte är påverkade av ledande mineral i berget.

SKI efterlyser också tydligare koppling mellan kvantifieringen av matrisdiffusionsdjup och bergets egenskaper. Man ansåg att SKB bör koppla kvantifieringen av matrisdiffusionsdjup till bergets egenskaper, till exempel olika typer av mikrosprickor, graden av mineralomvandlingar och tillgänglighet av bergmatrisen för diffusion.

SKI efterfrågade även en analys av testerna från ”single well injection withdrawal” (Swiw) med målsättningen att öka förtroendet för parameteriseringen av transportmodellerna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Data på diffusionsegenskaper från Platsundersökningarna har presenterats för Forsmark /25-96/ och Laxemar /25-97/. Ytterligare tolkning av dessa data återfinns i /25-86/ och /25-98/ för respektive plats. Studier av bergarternas diffusionsegenskaper ger formationsfaktorer (det vill säga hur mycket lägre diffusiviteten i bergarten är jämfört med diffusiviteten i rent vatten). Både resultat för genomdiffusionsmätningar i laboratorium samt elektriska resistivitetmätningar i laboratorium och fält presenteras. Laboriemätningar av formationsfaktorn med elektriska metoder visade sig ge högre värden än motsvarande in situ-mätningar, vilket indikerar att spänningsavlastning och störningar i proverna på grund av borrhiningen kan orsaka en överskattning av diffusiviteten i laboriemätningarna.

En studie har också genomförts för att utvärdera de osäkerheter som finns associerade med den elektriska resistivitetsmetoden för mätning av formationsfaktorn /25-100/. I studien jämförs den geometriska formationsfaktorn, som fås från genomelektromigrationsförsök och genomdiffusionsförsök, med den skenbara formationsfaktorn som fås med elektriska metoder. Resultaten indikerar att en överskattning av formationsfaktorn kan göras, på grund av ytkonduktivitetseffekter, om den skenbara formationsfaktorn används direkt. Detta gäller specifikt för ytliga förhållanden där grundvattnet typiskt har låg salinitet. Vid hög jonstyrka är skillnaden mellan den erhållna skenbara och geometriska formationsfaktorn liten /25-100, 25-99/ vilket pekar på att elektriskt ledande mineral inte nämnvärt påverkar resultaten. Resultaten här svarar upp på myndigheternas önskan att påvisa att ledande mineral inte påverkar elektriska mätningar av jonrörlighet.

Ett långtidsförsök för bestämning av diffusions- och sorptionsegenskaper in situ har genomförts på typiskt förvaringsdjup i Äspölaboratoriet. Experimentet pågick utan avbrott eller andra störningar och avslutades enligt plan efter drygt sex månaders drift. Berget runt testsektionerna i den avskärmade sprickan respektive i bakomliggande matrisberg togs ut med överborrning. Små provkärnor med 24 millimeters diameter har tagits ut från den stora borrhälskärnan från överborrningen. Totalt 18 borrhälskärnor, cirka 17 centimeter långa, borrades från sprickytan på stubben. Runt testsektionen i smalborrhålet (diameter 36 millimeter) togs 16 borrhälskärnor ut i matrisberget. Provkärnorna har scannats med scintillationsdetektor och mätts med gammaspektrometri. Provkärnorna har detaljkarterats och fotograferats genom stereolupp. Därefter har de kapats i tunna skivor och mätts med autoradiografi för bestämning av radioaktivitetens fördelning i skivorna. Nuklidspecifika analyser av skivorna för bestämning av penetrationsprofiler har genomförts. Autoradiografi visar att radioaktiviteten (det vill säga spårämneshalten) är ojämnt fördelad, speciellt i berget intill sprickytan, vilket kan kopplas till den rumsliga fördelningen av porositet och mineral. Penetrationsdjup upp till sex centimeter för svagsorberande (Na, Cl) och några centimeter för Cs har observerats. De ämnen som bildar ytkomplex (till exempel Gd och Ni) sorberas på sprickytorna och de inre ytorna i bergmatrisen. För Ni är det observerade maximala penetrationsdjupet tre millimeter i bergmatrisen och 5–6 millimeter i berget intill sprickan. Dessa resultat svarar upp på myndighetens påpekande att SKB bör visa på sambandet mellan diffusionsdjup och bergets egenskaper.

Stödande laboratorieexperiment har genomförts med prover från in situ-experimentets bergmatris och sprickyta (från ett närliggande parallellt undersökningsborrhål) samt samma nuklidcocktail som in situ-experimentet, med tillägg av tritium. Mätningarna har gjorts på hela bergbitar och krossat bergmaterial i tre storleksfraktioner. Mätningar av sorption på hela bergbitar visar samma relativa sorptionsstyrka, det vill säga förhållandet mellan nukliderna, vid laboriemätningarna som i in situ-experimentet. Att jämföra in situ-resultat med resultat från laboriemätningarna på bergprover är inte fullt ut görligt ännu, eftersom resultat från in situ-mätningarna är under utvärdering.

Effekten av biofilm på matrisdiffusion hanteras i avsnittet om Mikrobiella processer (avsnitt 25.2.16). Resultat från analyser av matrisporvatten redovisas i avsnitt 25.2.14.

Program

Beträffande mätningar av formationsfaktorn med elektriska resistivetsmetoder kommer en korrektionsmetod för att hantera denna problematik att föreslås redan inom SR-Site och presenteras i Data Rapporten för SR-Site.

Inom LTDE-SD projektet återstår några kompletterande mätningar och kvalitetskontroller av experimentella data. Vidare återstår utvärdering, modellering samt rapportering.

En enklare uppsättning av LTDE-SD ska testas som en möjlig metod för undersökning av transportegenskaper på förvaringsdjup i samband med detaljundersökningarna. Detta ska utföras i Äspölaboratoriet under innevarande period.

25.2.14 Reaktionen med berget – grundvattenkemi

Upplösning och utfällning av sprickmineral är en ständigt pågående process. Den största mängden sprickmineral har bildats under hydrotermala förhållanden (och är alltså äldre än 400 miljoner år), men även lågtemperaturmineral förekommer, till exempel kalcit. Dessa kan utnyttjas för att förstå

grundvattnets utveckling, till exempel avseende redoxförhållanden. Reaktionen med bergmatrisens mineral sker i en begränsad omfattning och processerna är långsamma, men på lång sikt kan dessa reaktioner med bergmatrisens primära mineral få en ökad betydelse för grundvattnets kemi.

Oxiderande förhållanden på förvarsdjup kan delas upp i två delproblem:

- Förvaret kommer att vara syresatt under byggnad och drift. En del syre kommer alltså sannolikt att vara kvar i förvaret och dess närhet efter förslutningen.
- Farhågor har framförts om att syresatt grundvatten skulle kunna tränga ned till förvarsdjup under perioder med kraftigt förändrade hydrogeologiska betingelser, exempelvis i samband med en glaciation.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Redovisningen i Fud-program 2007 innefattade fortsatta försök med vittring av järnhaltiga sprickfyllnadsmineral, främst med syfte att kartlägga är förekomsten av mikrobiella processer vid laboratorieförsök. Åldersbestämning med hjälp av järn(III)oxider och uranserieanalyser planerades, liksom mätningar av spår av organiska molekyler, så kallade biomarkörer.

SKI påpekade i granskningen att den modellering som utförts inom ramen för SR-Can bör kompletteras med en analys av osäkerheter i både bergets reducerande förmåga och modellerna för infiltration av glacialt smältvatten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Som ett resultat av tidigare EU-projekt (Equip och Padamot) har en metodik för sprickmineralogiska undersökningar tagits fram /25-101/ och denna har applicerats i platsundersökningarna för Forsmark och Oskarshamn. Studier av stabila isotoper och spårelement finns redovisade i /25-102/ och /25-103/. Dateringar av sprickmineral och den senare tektoniska utvecklingen på platserna har dokumenterats med hjälp av direkta och indirekta dateringsmetoder /25-104, 25-105/. Användningen av sprickmineral för ökad förståelse av paleohydrogeologi har också diskuterats i andra internationella konstellationer /25-106/. Sammantaget är erfarenheterna av den använda metodiken positiva och metodiken kan anses ge de resultat som behövs för en förståelse av platsen med hänsyn till så väl tidigare som pågående interaktion mellan mineral och vatten. Av avgörande betydelse för resultatet är, förutom noggrant analysarbete och mikroskopi, tillgången på borrhälsmaterial av hög kvalitet, som möjliggör provtagning av ostört material. Integration av hydrogeokemisk och hydrogeologisk information är också en viktig komponent.

För att kunna utvärdera risken att glacialt smältvatten når förvarsdjup, har fördelningen av redoxkänsliga sprickmineral, till exempel pyrit, studerats i detaljerade undersökningar i Laxemar /25-107/ och Forsmark /25-108/ och inom de nu i Äspölaboratoriet pågående studierna av uranseriens isotoper. Dessa studier visar att reducerande förhållanden har rått på förvarsdjup under lång tid och att syre konsumeras i de övre 150 meter i berget, om inte redan i jordlagret. Uranserieanalyser har bidragit till den information om redoxförhållanden som erhållits via studier av mineral och elementfördelning, dels för att uran är redoxkänsligt, dels för att analyserna av isotoperna i uranserien kan urskilja processer som varit aktiva under den sista miljonen år. En metodikstudie gällande uranserieanalyser har resulterat i en rekommenderad analys och provtagningsmetodik. Specialstudier av Fe(III)oxider i syfte att differentiera mellan potentiellt unga Fe(III)utfällningar och äldre utfällningar har gjorts och gett positiva resultat. Fe-isotoper och Fe(II)/Fe(III) har bestämts och vidare har detaljerad XRD kombinerats med SEM studier /25-109/. Med hjälp av denna metod kan man bland annat identifiera artificiella Fe(III)utfällningar uppkomna i samband med borrhningen.

Sprickmineralen och sidoberget bidrar med tillgänglig buffertkapacitet. Det är därför väsentligt att kartlägga utbredning och mängd av till exempel mineral som kan fungera som buffert för redox eller pH. Rödfärgning, det vill säga oxidering, av sidoberget är vanligt förekommande längs många sprickor. Detaljstudier har genomförts både i Forsmark /25-110/ och Laxemar-Simpevarp /25-111/ för att dels beskriva ursprunget på rödfärgningen, dels beskriva hur mycket av sidobergets reduktionskapacitet som bevarats. Det visade sig att omvandlingen av sidoberget, på båda platserna, är av hydrotermalt ursprung (det vill säga mycket gammal). Den består framför allt av en mineralogisk

omvandling av biotit till klorit, plagioklas har omvandlats till finkornig glimmer (sericit) och partiell oxidation av magnetit. Den röda färgen har uppkommit genom att mikrokorn av hematit har impregnerat framför allt den omvandlade fältspaten. Den totala minskningen av Fe(II) är liten och i många fall försumbar.

En statistisk bearbetning av mängderna av olika sprickmineral (baserat på kartering) har inte tidigare varit möjlig men detta har framgångsrikt testats i såväl Forsmark som Laxemar /25-98, 25-86/.

Studierna av vittringshastigheter har resulterat i en avhandling /25-112/. Upplösningshastigheterna kan användas för att uppskatta frigörelsen av Fe(II) till grundvatten.

Program

För att öka förståelsen av processer som kan påverka provtagningen och analysen av sulfid i grundvatten planeras isotopstudier av lågtemperaturutfällningar av sulfidmineral i spricksystemet (såväl naturligt förekommande utfällningar som de eventuellt orsakade av störningar förorsakade av borrhålet).

De vunna erfarenheterna gällande uranserieanalyser tillsammans med bestämning av oxidationsgrad hos sprickmineral kommer att appliceras på uranhaltiga mineral från sprickor i Forsmark i syfte att bättre förstå vilka processer som orsakat mineralutfällningarna samt vilka processer som löser upp dem och ger de förhöjda uranhalter i grundvattnet. Vidare kommer uranserieanalyser tillsammans med mineralogi och spårelementkemi att appliceras för att studera penetration av syresatt vatten i glacialområden. Det senare planeras inom ramen för Grönlandsprojektet, se avsnitt 19.6.

Data som ska kartlägga abiotiska reaktioner mellan löst syre och olika mineral förvarade i sterila flaskor kommer att tas fram. Studierna ska bland annat undersöka skillnaden mellan olika mineral och bergarter, effekten av olika materialberedningsmetoder (sönderdelning) på reaktionsytorna och reaktionshastigheten. Preliminära resultat visar att mikrobernas närvaro har en starkt påskyndande effekt på syrets bortfall.

Studier kring redox-förhållanden och metodutveckling för att förbättra redox-mätningar kommer att bedrivas inom EU-projektet Recosy (Redox phenomena controlling systems) där flera av SKB:s samarbetsgrupper i Sverige och utomlands är deltagare.

För att kunna förstå hur grundvattnets salinitet ändras med tiden planeras studier av jonbytesprocesser. Dessa studier kan resultera i en kvantifiering av utbytet av Na och Ca när regn- eller havsvatten infiltrerade de områden som har undersökts av SKB. Sr-isotop data som togs fram i Äspö skulle också kunna bidra med kunskap om dessa processer.

25.2.15 Reaktioner med berget – sorption av radionuklider

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 planerades färdigställande av ett doktorandprojekt om elektriska metoder för mätning av K_d -värden. Utveckling av processbaserad modellering av sorption och reaktiv transport samt genomförande av analysfasen och rapporteringen av LTDE-SD ingick även i programmet.

SKI ser i sin granskning positivt på programmet, men man anser också att SKB bör koppla konceptuella modeller för radionuklidsorption till bergets egenskaper, exempelvis graden av mineralomvandlingar, mikrosprickor och tillgänglighet av bergmatrisen. SKI efterfrågar också större tydlighet i programmet om metodiken för bestämning av K_d -värden.

I granskningen påpekar Kärnavfallsrådet att det är angeläget att programmet för radionuklidsorption genomförs enligt planerna.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Data från Platsundersökningar har presenterats för Forsmark /25-96/ och Laxemar /25-97/. Sorptionsmätningar (resulterande i fördelningskoefficient K_d) har gjorts på krossat material och på hela bitar. Vidare har CEC- (Cation Exchange Capacity) och specifik ytarea- (BET) mätningar gjorts.

Sorptionsresultaten indikerar att bergmaterial närmast intill sprickor (olika former av omvandlat berg) ger högre K_d -värden, jämfört med icke omvandlat berg. Det kan också tydligt observeras att spårämnen som förväntas adsorbera genom katjonbytesmekanism, adsorberar starkare med lägre jonstyrka i grundvattnet. Sorptionsmätningarna av ett litet antal prover från olika deformationszoner indikerar en varierande sorptionsstyrka jämfört med intakt berg, från svagare sorption för oxiderat sidoberg till förhöjd sorption för material från skjuvzoner.

Doktorandprojektet rörande elektriska metoder för mätning av K_d -värden har avslutats /25-113/. Arbetet redovisar en metod för hur sorption på hela bitar kan mätas med elektriska metoder. Fördelen med metoden är att den är flera storleksordningar snabbare än att använda sorberande ämnen i ett genomdiffusionsförsök där även K_d kan utvärderas. Även en metodik för mätning av BET-yta på hela bitar har utvecklats. Resultaten indikerar att både sorption och ytareamätningar på krossat material kan överskatta sorptionsegenskaper respektive ytarea. Metoderna har redan använts för stödjande experiment inom platsmodelleringen och redovisas i detta sammanhang i /25-97/. De enskilda arbetena i avhandlingen presenteras i /25-114, 25-115, 25-116, 25-117/.

Inom området processororienterad sorptionsmodellering har ett doktorandprojekt påbörjats som drivs gemensamt på KTH och Chalmers. Bakgrunden till projektet är att sorptionen av radionuklider och andra spårämnen till geologiskt material i berggrunden typiskt har kvantifierats i detaljerade laboratorieförsök och tolkats i form av empiriska K_d -modeller för användning i säkerhetsanalysmodeller. Senare undersökningar har dock visat på konceptuella oklarheter i sådana modeller, där framför allt specifik ytarea, mineralogi och partikelstorlek utgör dominerande osäkerhet som potentiellt kan förklara åtminstone en del av den stora spridning i K_d -värden som iakttagits. Det aktuella projektet syftar till att formulera och testa processkvantifierande modeller och systematiskt kvantifiera sorptionen (jonbyte och ytkomplexering) av radionuklider till geologiskt material från Äspö, genom laboratorieförsök med speciell fokus på partikelstorleksberoendet samt lokaliseringen (mineral och ytstrukturer) av sorptionen.

Under den inledande perioden av projektet har arbete med de rena mineralen labradorit, klorit och magnetit utförts. Dessa mineral representerar vanligt förekommande och särskilt sorptionsstarka mineral i svensk granit. Vid den extrapolering av sorptionsresultat från laboratorieförsök till fältförhållanden som ofta görs, antas sorptionen i regel vara proportionell mot den specifika ytarean. Experimentella resultat visar dock att sorptionen av Ni^{2+} till klorit är snarlik mellan två olika prover med mycket olika specifik ytarea /25-118/. Detta är ett beteende som möjligen kan förklaras av de anisotropa egenskaperna hos klorit, som är ett skiktmineral, där liknande reaktiva ytor mellan proverna kan uppstå vid skillnader i mineralens morfologi. Resultaten indikerar att för att ge relevanta K_d -värden, bör sorptionen relateras till den reaktiva ytan, snarare än den totala specifika ytarean. Den reaktiva ytarean kan förväntas spela en avgörande roll också för andra viktiga ytkemiska reaktioner, såsom mineralvittring och reduktion av molekylärt syre vid reducerande minerals ytor. I dag finns dock inga experimentella metoder för direkt och enkel kvantifiering av den reaktiva ytan hos ett mineralprov genom experimentella eller teoretiska metoder.

Experimentet LTDE-SD har genomförts in situ utan avbrott eller andra störningar och avslutades enligt plan efter drygt sex månaders drift. Resultaten beskrivs i avsnitt 25.2.13.

Program

En enklare uppsättning av LTDE-SD, som ska testas i Äspölaboratoriet under kommande period (se avsnitt 25.2.13), förväntas ge in situ K_d -värden (snarare än diffusionsvärden).

Även en fortsatt utveckling planeras för mätning av CEC och BET på hela bitar. Kopplat till detta är att utveckla en metodik för tolkning av olika typer av K_d -mätningar. Arbetet med denna metodikutveckling utförs inom ramen för SR-Site, men utvecklingen kommer att fortsätta även efter slutrapporteringen av SR-Site.

Utvecklingen av mekanistisk modellering av sorption (ytkomplexering och jonbyte) fortsätter inom projektet Äspö Transportmodell. Under perioden 2010–2012 kommer den specifika ytarean och porositeten som funktion av partikelstorleken att studeras i projektet för ett antal mineral och bergprover, som ett led i att öka förståelsen för relationen mellan sorptionsegenskaper som iaktas i laboratorieförsök och de i fält. Stödjande laboratorieförsök för sorption av några radionuklider

till samma mineralprover kommer också att utföras. För att söka knyta samman sorptionen med den reaktiva ytan kommer autoradiografi att användas för att experimentellt försöka identifiera vilka specifika mineral, i ett komplext geologiskt material som granit, som sorberar radionukliden. Vidare kommer möjligheterna att använda autoradiografi för att associera sorptionen till speciella ytstrukturer eller korngränser i rena mineral eller granit att undersökas. Autoradiografi kommer också att användas till att försöka undersöka sorptionen av radionuklider till olika ytor av ett anisotropt mineral, till exempel klorit eller biotit, som ett ytterligare steg i att undersöka betydelsen av olika ytor för ett minerals reaktivitet. Baserat på resultat från dessa undersökningar och litteratordata kommer modeller för radionuklidsorption till granitiska material att formuleras enligt den så kallade "Component additivity"-metoden /25-119/. För att undersöka modellernas tillförlitlighet och användbarhet, kommer modellresultat att jämföras med iakttagelser från laborieförsök med sorption på granit.

25.2.16 Mikrobiella processer

Mikrober kan påverka grundvattnets kemi genom att påskynda reaktioner som skulle ske mycket långsamt eller inte alls i deras frånvaro, till exempel sulfidbildning. Främst påverkas redoxreaktioner, men även fällnings- och vittringsreaktioner och radionuklidtransportprocesser kan påverkas /25-120/.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs resultat från det laboratorium som upprättats i Äspölaboratoriet /25-121/. Detta arbete gav ökad kunskap om mikrobiella processer under förvarsförhållanden med avseende på mikrobiologisk mångfald, kemisk miljö, lösta gaser, tryck och temperatur. Effekten av mikrobiella biofilmer på sorption av radionuklider och matrisdiffusion beskrevs /25-122, 25-123, 25-124/. Det visades också att radionuklidtransport också kan påverkas av komplexbildare utsöndrade av mikroorganismer i grundvatten /25-125/.

I programmet ingick fortsatt forskning kring mikrobers inverkan på sulfidbildning, syre-reduktion och buffring av redox-potentialen, inverkan av bakteriofager (virus som angriper bakterier) samt start av nya modelleringsprojekt.

SKI bedömde att den av SKB planerade forskningen kring mikrobiella processer är angelägen. Den mest betydelsefulla frågan, särskilt i fall med buffererosion, måste anses vara förståelse av hur pass aktiva sulfatreducerande bakterier kan antas vara under förvarets långsiktiga utveckling. Möjligheten att förutsäga omfattningen av kopparkorrosion beror delvis på hur väl begränsande och styrande faktorer kunnat identifieras och undersökas. SKI noterar att SKB i SR-Can inte diskuterade mikrobiell aktivitet under perioder med permafrost och glaciation.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Forskningen om mikrobiella processer, som leder fram till bildning av sulfid, samt om mikrobers förmåga att buffra redoxpotentialen på en låg och för förvaret gynnsam nivå har fortsatt /25-126/. Arbetet har utförts på förvarsdjup i Äspölaboratoriet under in situ-förhållanden med naturligt förekommande mikrober samt på kandidatplatserna Laxemar /25-127/ och Forsmark /25-128/.

Nya metoder har utvecklats för bestämning av biomassa i grundvatten /25-129/. Förekomst av bakteriofager /25-130/ och deras inverkan på sulfatreducerande bakterier /25-131/ har undersökts. Mikrobiell mobilisering och immobilisering av radionuklider har kvantifierats under olika förhållanden /25-132, 25-133, 25-134/.

Ett projekt med syfte att modellera mikrobiella processer med erhållna resultat från platsundersökningarna och Äspölaboratoriet har påbörjats. Efterhand som forskningen om mikroorganismer i geosfären genererat nya resultat har de tagits med i modelleringsverktyg /25-135, 25-136/.

Utveckling av modeller har inriktats särskilt mot sådana mikrobiella processer som kan inverka negativt på någon barriärfunktion, till exempel sulfatreduktion till sulfid.

Program

Forskningen om mikroorganismers förmåga att hålla den kemiska miljön i när- och fjärrområdet vid en låg och stabil redox potential kommer att fortsätta. Fokus ska vara på mikrobernas förmåga till sulfidbildning och syrereduktion i när- och fjärrområdet.

Sambanden mellan innehåll och fördelning av gaser och mikrobiella processer i djupa grundvatten kommer också att utforskas. Insatser planeras även för metodutveckling samt för ökad kunskap om gaser och deras ursprung i grundvatten och bergmatris. Studier av mikroorganismers och virus förmåga att påverka radionuklidernas rörlighet i naturlig geosfärsmiljö, där biofilmer utvecklas på spricktytor och sprickmineral, kommer att fortsätta. Behovet av vidareutveckling av modellverktyg för mikrobiella processer kommer att ses över.

Mikrobiell aktivitet under perioder med permafrost och glaciation hanteras inom ramen för SR-Site.

25.2.17 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial

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.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Forskningen om denna process i Fud-program 2007 fokuserade kring lakning av cementmaterial med lågt pH i porvattnen, dels i ett in situ-projekt i Grimsel, Schweiz, dels i ett samarbetsprojekt med Posiva. Fortsatta arbete inom detta projekt ingick i programmet.

I granskningen anser SKI anser att de planerade försöken är angelägna samt att SKB även bör belysa eventuella effekter av cementlakning på de tekniska barriärerna.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Resultaten från experimentet i Grimsel, Schweiz, med syfte att studera hur betongporvatten reagerar med bergmineral, har publicerats /25-137, 25-138/.

Utveckling och test av så kallade låg-pH-injekteringsmaterial, det vill säga injekteringsmedel som ska ha porvatten med pH lägre än cirka 11, beskrivs i avsnitt 15.5.3. Lakning av låg-pH-cement utfördes i en gemensam studie med Nagra, Numo och Posiva med syfte att undersöka om organiska cementtillsatser kan lakas ur och om dessa kan påverka radionuklidsorption på berg /25-139/.

Program

Studier av organiska cementtillsatser kommer att fortsätta. SKB kommer också att fortsätta arbetet med att modellera degraderingen av cementmaterial under långa tidsperioder.

Övriga oorganiska konstruktionsmaterial är huvudsakligen stål. Detta område bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning för KBS-3V, men det kan ha en viss betydelse för KBS-3H /25-140/.

25.2.18 Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten

Kolloider är partiklar i storleksordningen nanometer till mikrometer och har därför hög specifik yta. Kolloider kan stanna i lösning under långa tider om stabilitet föreligger. I granitiska grundvatten där mineraltytor och grundvatten jämviktat under långa tider, är salthalten relativt hög och kolloider är därför inte stabila. De naturliga kolloiderna består till stor del av ler-, kisel- och järnhydroxidpartiklar. Även organiska kolloider kan vara närvarande, men på cirka 400 meters djup är halterna låga.

Förutsättningarna för kolloidgenerering från bentonitbufferten kan förändras under en istidscykel. Under en inlandsis skulle smältvatten kunna tränga ned till förvarsdjup och i kontakt med bentonitbufferten finns det potential för montmorillonitkolloider att frigöras för vidare transport. Frigörelse av montmorillonitkolloider kan ge massförluster från bufferten, vars funktionalitet därmed skulle

reduceras. I fallet av en läckande kapsel kan även radionuklider sorberade till montmorillonitkolloider transporteras ut ifrån bufferten.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Transportförsök med latex- och bentonitkolloider resulterade i slutsatsen att dessa båda typer av kolloider beter sig på liknande sätt vid höga vattenflöden. Detta bekräftade att latexkolloider kan användas som modell för bentonitkolloider vid höga flöden. Experiment med bentonitkolloider i grundvatten i Äspölaboratoriet visade att bentonitkolloiderna föll ut snabbt och ingen transport skedde.

I programmet ingick studier av bentonitkolloiders stabilitet vid olika temperatur och jonstyrka. Bland annat planerades ett samarbete mellan Paul Scherrer Institut (PSI) och KTH med syfte att testa jämvikt-koncentration av bentonitkolloider vid olika typer av försök.

SKI efterfrågade en klarare bild av kvarstående frågeställningar och strategier vad gäller kopplingen mellan kolloider och bentoniterosion.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Mätningar av naturliga kolloider i Forsmark och Laxemar har utförts /25-127, 25-128/.

I kontakt med ett vatten som är i princip fritt från salt förväntas en koncentration av montmorillonitkolloider utanför bufferten vid jämvikt i storleksordningen 100 milligram per liter (mg/l) /25-141/. För att undersöka påverkan av flödes hastigheter, bentonittyp och grundvattenkemi på gelpropagering och vidare kolloidfrigörelse, genomfördes vid AECL i Kanada försök i en artificiell plexiglasspricka (ännu opublicerade resultat). Bentonit kompakterades till kutsar och avjoniserat vatten eller syntetiskt Grimsel grundvatten pumpades förbi. Kolloidkoncentrationer utanför bentonitkutsarna i försöken med avjoniserat vatten vid jämvikt ligger i paritet med koncentrationerna erhållna i /25-141/. I de försök där syntetiskt Grimsel-vatten använts låg jämvikt-koncentrationerna på en lägre nivå, storleksordning tio mg/l. Dessa halter har bekräftats med statistiska genererings- och sedimentationsförsök /25-142/. När montmorillonitkolloider utsätts för γ -strålning ökar också stabiliteten /25-143/. Varför denna effekt uppstår är inte helt klarlagt, men experimentella resultat indikerar att kvoten Fe(II)/Fe(III) i montmorilloniten ökar vilket resulterar i en högre negativ ytladdning på partiklarna och en högre repulsion mellan partiklarna.

Om montmorillonitkolloider genereras och är stabila i lösning så kan de transporteras bort från bufferten. Transportförsök på kolloider i en ren spricka i ett granitblock har utförts /25-144, 25-145/ för att särskilt undersöka påverkan av flöde, kolloidstorlek och kolloidtyp. Dessa försök har modellerats och retentionen i systemet tillskrivs en reversibel kolloidsorption till mineralytorna och en irreversibel fysikalisk filtrering /25-146/. Transportförsök har också utförts i kolonner packade med sprickfyllnadsmaterial. Sorption av kolloider till mineralytor i ogynnsamma förhållanden (repulsion mellan kolloid och mineral) har studerats parallellt till transportförsöken /25-147/.

Dipolförsök har också utförts i ett spricksystem på True-1-siten med fluorescerande latexkolloider. Genombrottskurvorna visar att latexkolloiderna transporterades under dessa betingelser, men osäkerheten i data är för stor för att kunna räkna ut filtreringskonstanter. Resultaten från in situ-experimenten kommer att publiceras i en slutrapport för Colloid Dipole och Transport projektet i slutet av år 2010.

Konkurrensen mellan sorption av radionuklider till kolloid och sprickfyllnadsmineral i grundvatten från Äspö (saltare grundvatten) och från Grimsel (mer utspätt grundvatten) har studerats på INE-FZK i Karlsruhe. I dessa försök associerar U-233, Tc-99 och Np-237 inte med montmorillonitkolloider, vilket däremot Th-232, Pu-242 och Am-243 gör. Ett transportförsök med radionuklider och montmorillonitkolloider i en väl karakteriserad spricka från Äspö uppvisar en något annorlunda trend, nämligen att Am, Pu men även U och till viss del Np transporteras med montmorillonitkolloider. Dessa försök är pågående och kommer att rapporteras i slutrapporten för projektet Colloid Dipole och Transport i slutet av 2010.

Program

Även om förutsättningar finns för att generera kolloider till höga koncentrationer, så kommer konsekvenserna vara kopplade till om transporten från bufferten är betydande. Tidigare studier visar att sorption och fysikalisk filtrering är signifikanta för kolloidtransport. Det finns också en möjlighet för kolloider att sätta igen små sprickor och begränsa flödesvägar. För att kunna prediktera kolloidtransport i sprickor med olika egenskaper behövs fler experiment att förlita sig på. Syftet ska vara att så småningom kunna ta fram modeller för montmorillonittransport i spricksystem till säkerhetsanalyserna. SKB deltar i CFM (Colloid Formation and Migration) samarbetet i Grimsel som planeras pågå minst till år 2013 och där in situ-transportförsök med montmorillonitkolloider planeras. Ett storskaligt bentoniterosionsförsök planeras också att utföras inom ramen för CFM.

När bentoniten sväller och genererar kolloider är det osäkert om de partiklar som frigörs befinner sig i jämvikt. Bilder av Ca-montmorillonitkolloider i ett år gamla lösningar visar på ellipsoidiska kolloider med partier av lägre densitet inne i kolloiden och ett hölje av högre densitet /25-148/. Man planerar undersökningar inom ramen för CFM-projektet för att ta reda på om bentonitkolloidernas storlek och struktur ändras med tiden. Behovet av ytterligare studier av γ -strålningseffekter på montmorillonitkolloider kommer att utredas.

Sorption av radionuklider till kolloider är ett område där det behövs mer data, inklusive kinetikdata. Storleksfördelningarna av de undersökta kolloiderna i befintliga studier är väldigt breda och sorptionsvärdena är normerade mot massan, där de rimligen borde vara normerade mot yta. Sorptionskinetiken är oftast väldigt snabb och desorptionen mycket långsam, vilket är en förklaring till att det finns så få framtagna hastighetskonstanter. Man planerar därför att driva experimentella studier för att undersöka effekten av kolloidstorleken och för att ta fram de kinetikdata som behövs till modellerna som används inom säkerhetsanalyserna.

25.2.19 Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider

Slutsatser sedan Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 konstaterade SKB att frågor kvarstod angående kolloiders inverkan på retentionen av radionuklider. Detta skulle studeras inom ramen för Colloid-projektet där experiment planerades för att utföras in situ i en borrhärla.

SKI ansåg att SKB:s redovisning inte gav en tydlig bild av vilka kvarstående problemställningar som är viktigast att utröna och hur strategierna för att ta itu med dessa såg ut.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Ett doktorandprojekt som studerat bildning, stabilitet och transport av kolloider har avslutats /25-147/. Resultaten diskuteras ovan (Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten) förutom transport som berörs här.

Som omnämnt i avsnitt 25.2.18 har kolonnförsök med Na-montmorillonit och latexkolloider som transporteras genom kolonner fyllda med sprickfyllnadsmaterial genomförts. Resultaten indikerar att kolloider sorberar på mineralen och därmed fördröjer kolloidtransporten. Na-montmorillonitsorption är reversibel, medan sorption av latexkolloider är irreversibel under experimentets förlopp. Modellering av kolloidtransport kopplat till kolloidprojektet har utförts i /25-146/.

Inom SR-Site modelleras radionuklidtransport med kolloider. Både reversibel sorption på kolloider samt irreversibel sorption på bentonitkolloider studeras inom ramen för SR-Site.

Program

Utvecklingen av kolloidmodellering fortsätter. Detta inkluderar både utveckling av modelleringsverktyg där eventuellt Marfa ska uppdateras för att inkorporera radionuklidtransport med kolloider, samt studier för att förbättra förståelsen av de styrande processerna, specifikt kopplat till bentoniterosion och kolloidbildning, se avsnitt 24.2.20 och 25.2.18.

25.2.20 Gasbildning/gaslösning

Gaser som förekommer lösta i grundvattnet 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. Kväve har huvudsakligen sitt ursprung i jordens bildning, det vill säga N₂ kondenserades med resten av material när planeten bildades, och N₂ har sipprat till atmosfären genom geosfären sedan dess. De flesta andra gaser kan ha flera källor.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Den totala mängden löst gas i svenska grundvatten varierar mellan cirka 30 till cirka 100 milliliter per liter (ml/l) grundvatten, 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 har högre gasmängder påträffats, upp till 300–400 milliliter gas per liter grundvatten /25-149, 25-150/. Här har gasen också en mer varierande sammansättning.

I Fud-program 2007 planerade SKB utveckling av metoder och utrustning för gasanalys i grundvatten. Möjlighet att analysera lösta ädelgaser skulle undersökas. Ursprung och transport av metan och väte identifierades som viktiga frågor i programmet.

I granskningen ansåg SKI att SKB hade identifierat viktiga frågor och de stödjer planerna för en utveckling av utrustningen och analyserna för gasprovtagning.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Databasen över lösta gaser i grundvatten byggs kontinuerligt på /25-126/, dels med data från grundvattnen runt Äspölaboratoriet, dels med data från grundvattnen vid platsundersökningarna.

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 25.2.16.

Program

Studier för att förstå ursprunget och transporten av metan och väte är av vikt för säkerhetsanalyser av slutförvaret eftersom dessa gaser kan användas för mikrobiell sulfatreduktion till sulfid. En mycket användbar parameter för att förstå diffusionen av gaser i berget är heliumisotopsammansättning. Den tyngsta isotopen, He-4, bildas från radioaktivt sönderfall av uran och torium både i manteln och i skorpan och diffunderar upp till ytan genom bergmatrisen och i spricksystem. Den andra isotopen, He-3, bildas bland annat av tritiumsönderfall som normalt har sitt ursprung i atmosfären. Analys av heliumisotoperna kan därför vara avgörande för beskrivning av gastransport och man måste därför bygga vidare på befintliga data /25-151/. Utrustningen för provtagning av gas och gasanalys behöver utvecklas ytterligare, och provtagning och bestämning av isotopsammansättningen behöver fortsätta både i Äspö och i Forsmark då den detaljerade platsundersökningen påbörjas.

25.2.21 Metanisomsättning

Vid låg temperatur och högt tryck bildar vatten och metangas en fast fas som kallas metanis. Metanis kan till exempel bildas under permafrost /25-152/.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKB slutförde tillsammans med forskare från Finland och Kanada studier av en guldgruva i permafrostområde i Kanada (Lupin Mine) /25-153, 25-154/. Ingen metanis påträffades under studierna i Lupingruvan. I programmet ingick fortsatta studier i gruvor i Kanada samt vidare undersökningar av porvatten- och grundvattenkemi vid platsundersökningarna.

I granskningen bedömer SKI att fortsatta insatser på dessa områden är påkallade, men att man har svårt att bedöma om SKB:s studier i gruvor i Kanada är ändamålsenliga.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007

Inga metanhydrater påträffades i Lupin Mine, men vissa indikatorer på deras tidigare närvaro noterades i /25-155/. Detta inkluderade identifiering av tänkbara områden under permafrostlagret där inducerad tryckfall på grund av gruvdriften kan ha lett till smältning av metanhydrater, vilket kan ha bidragit till den utspädning som observerats i några subpermafrostgrundvatten. Permafrost studierna har fortsatt i High Lake /25-156/.

Möjligheten att spåra tidigare förekomster av metanhydrat har hafts i åtanke under platsundersökningar /25-73, 25-74/, men inga övertygande bevis hittades av studierna av matrisporvatten.

Program

För att förstå metanisbildning krävs kunskap om metanets ursprung och möjligheter att transporteras. Simuleringar kommer att genomföras för att bedöma potentialen för bildningen av metanhydrat under kommande permafrost. Studier i permafrostområden kommer att fortsätta antingen i andra gruvor i Kanada eller i Grönland. Fortsatt vaksamhet rörande metanhydrater kommer att fortsätta inom hydrogeokemiska studierna på Äspö och Forsmark.

25.2.22 Saltutfrysning

Då saltvatten fryser långsamt tvingas merparten av de lösta ämnena (salter) ut i den lösning som blir kvar när isen bildas. Processen kan ha betydelse i samband med kallt klimat, till exempel under en period med permafrost.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Inom säkerhetsanalysen SR-Can utförde SKB generiska modellstudier med syfte att undersöka om utfrysna salter under ett permafrostlager skulle kunna bli så koncentrerad att det skulle 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 lågt hydraulisk konduktivitet är det salta grundvattnet relativt orörligt /25-157/.

SKB planerade i Fud-program 2007 att fortsätta deltaga i undersökningarna av gruvor i permafrostområden, se avsnitt 25.2.21.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007

Studierna i Lupin Mine har nu avslutats, och även om frysprocesser har ägt rum har det varit svårt att kvantifiera i vilken grad frysningen har ändrat grundvattenkemin i området /25-155/. Svårigheten förvärras av typen av plats, där det finns omfattande föroreningar på grund av långvarig gruvdrift och även blandning av olika typer av grundvatten under permafrostlagren.

Blandning av olika typer av grundvatten har också försvårat tolkningen av hydrokemiska data från Forsmark och Laxemar, men en fingervisning om frysprocesser kan ha bevarats i synnerhet i Laxemar /25-73, 25-74/. Isotoperna av syre, bor och klor kan vara känsliga för utfrysningsprocesser, antingen blir de anrikade i isen (O-18 och Cl-37) eller i den återstående vätskan (B-11). Tolkningen av isotopdata har tillämpats på Laxemar, (särskilt bräckt grundvatten av glacial typ som oftast påträffas vid cirka 300–600 meter och som verkar ha varit relativt väl bevarad i berggrunden) visar en minskning av hydraulisk konduktivitet med ökande djup. Grundvattenanalyserna visar en ökning av B-11 i de flesta av dessa grundvatten och kan vara ett resultat av utfrysningsprocesser. Dessutom visar fördelningen av Cl-37 ett svagt samband mellan ökningen för Cl-37 och utarmningen av B-11 i samma grundvatten, vilket stöder också en eventuell frysningseffekt.

Ett antal porvattenprover från ett djup intervall mellan 430–550 meter och 620–750 meter vid Laxemar visar höga Na-Ca-SO₄ halter. Ursprunget till denna sulfat är oklart, men möjliga källor är upplösning av gips och/eller ändringar framkallade genom frysprocesser.

Sammanfattningsvis, även om det finns visst stöd för utfrysningsprocesser som inträffade vid Laxemar (mindre vid Forsmark), har det varit omöjligt att kvantifiera i vilken grad frysningen har modifierat kemin i grundvatten, i likhet med studierna i Lupin Mine.

Program

Studier i permafrostområden kommer att fortsätta inom Grönlandsprojektet (GAP) och eventuellt i andra gruvor i Kanada (det vill säga High Lake, Nunavut Territory). Fortsatt vaksamhet gällande indikationer på saltutfrysning kommer att fortsätta inom de pågående hydrogeokemiska programmen på Äspö och Forsmark.

25.3 Modellering

25.3.1 DFN

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Myndigheterna konstaterar att SKB bör fortsätta utveckla diskreta spricknätverksmodeller, beakta sammanbindning av existerande sprickor, utveckla metoder för identifiering av sprickor i tunnlar samt att det är positivt att SKB arbetar vidare med att ta fram diskreta spricknätverksmodeller för densitetsdriven strömning.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Både i Forsmark och Laxemar har det tagits fram diskreta spricknätverksmodeller, DFN-modeller, under arbetet med platsbeskrivningarna. För båda platserna har det tagits fram geologiska och hydrogeologiska spricknätverksmodeller, där den geologiska modellen beskriver alla sprickor på platsen medan den hydrogeologiska endast karakteriserar de öppna och sammanlänkade sprickorna.

Det är inte trivialt att entydigt kunna förutsäga sprickornas fördelningar av intensitet, orientering och storlek utifrån data från ytborrhål och data från hållar. Beroende på vilka antaganden som görs blir det skillnader i modellerna. Både /25-158/ och /25-159/ presenterar ett antal olika troliga modeller för den geologiska spricknätverksmodellen beroende på vilken konceptuell modell som ligger till grund för framtagandet. Detta tillsammans med osäkerheter kan generera en svårhanterlig mängd möjliga modeller.

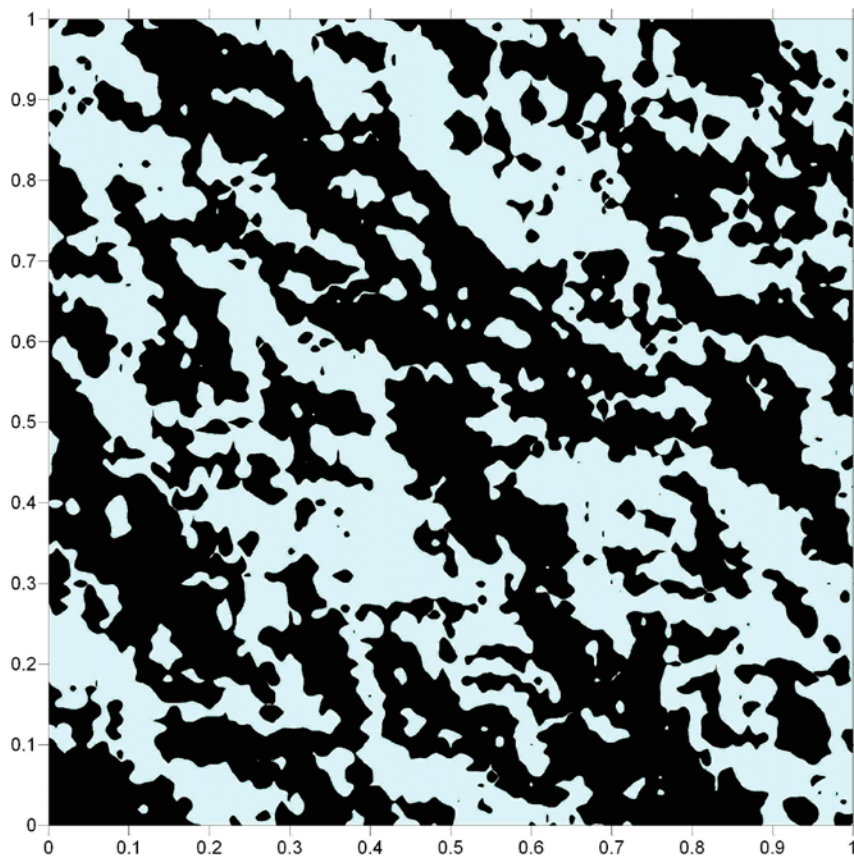
Genom att redan i framtagandet av den geologiska DFN-modellen beakta fler parametrar, såsom data från ytterligare en mätskala, hydrogeologisk information, bergspänningar eller geofysisk information, kan utfallsrummet krympas och antalet modellvarianter minskas. Utfallsrummet skulle kunna minskas ytterligare genom en ökad förståelse för kopplingen mellan mätningar i olika skalor, till exempel håll kontra lineament, och dimensioner, till exempel borrhål kontra tunnelvägg.

Ett nytt sätt att inkorporera osäkerhet och variabilitet i DFN modeller beskrivs i /25-160/ som även presenterar en statistisk metod att koppla samman bergenheter till bergdomäner. Där utvecklas också en alternativ metod att tolka data vilket resulterar i ännu en modellvariant med sprickor som trunkeras mot andra sprickor. Andra som studerat alternativ för generering av spricknätverk är /25-161/.

Ett system för att ranka trolighet samt verktyg för att utvärdera skillnader mellan olika modeller i ett tidigt skede behövs för att inte alla teoretiskt möjliga modeller propageras till avnämarna med risk att det sammanlagda utfallsrummet blir alltför stort.

Vid framtagande av de hydrogeologiska spricknätverksmodellerna /25-18/ och /25-16/ ligger den geologiska modellen till grund, men även hydrogeologisk kunskap och data beaktas samt andra konceptuella antaganden görs, till exempel antagande om minsta detekterade spricka i borrhålet. En konsekvens av den metod som använts i /25-18/ och /25-16/ är att intensiteten överskattas och storleksfördelningen av sprickset som har stupning nära 90 grader skevas. Detta sammantaget gör att det finns vissa skillnader mellan till exempel den geologiska DFN-modellen och den hydrogeologiska.

En överskattning av intensitet och storleksfördelning tillsammans med konstanta egenskaper över hela sprickplanet kan leda till att flödeskapaciteten överskattas. Redan i /25-88/ studerades ett nätverk av ett fåtal sprickor som gavs heterogena egenskaper för varje enskilt sprickplan, med hjälp av en rönnätverksmodell, för att se hur heterogeniteten inom ett sprickplan påverkar totala flödet genom spricknätverket. Slutsatserna var att den interna heterogeniteten var underordnad den heterogeniteten som uppstår mellan de diskreta sprickorna. Dock antogs hela sprickplanet vara mer eller mindre öppet och därmed mer eller mindre flödande, vilket inte nödvändigtvis är fallet, se figur 25-2.



Figur 25-2. Syntetiskt sprickplan (1×1 meter), som visar områden med apertur (ljusblå) och utan apertur (svart).

En ökad förståelse av geometrin på enskilda sprickplan kan leda till en ökad förståelse av flödet genom sprickan samt dess egenskaper och bidrag till flöde i ett diskret spricknätverk.

Program

Arbetet med att få en bättre förståelse av spricknätverket i kristallin berggrund fortsätter för att om möjligt, kunna få en mer integrerad och därmed mer realistisk och mindre pessimistisk bild som tar hänsyn till de geologiska, bergmekaniska och hydrogeologiska aspekterna på berget.

Utifrån den nyvunna kunskapen har sex punkter identifierats där tid kommer att läggas ner för att öka förståelsen av diskreta spricknätverk i kristallin berggrund. SKB planerar att:

- undersöka hur uppskattad intensitet beror på mätmetod,
- utreda vilka extra data som måste beaktas för att begränsa möjliga värden och kombinationer av värden för indata och därmed begränsa utfallsrummet för modellerna,
- utveckla metod för att enklare kunna utvärdera skillnader mellan olika modeller,
- ytterligare utforska sprickornas aperturfördelning över sprickplanet,
- studera effekter av sammankoppling av sprickor, till exempel genom kanalbildning, trunkering mot andra sprickor, eller alternativa metoder för generering av spricknätverk, samt
- fortsättningsvis utvärdera alternativa koncept för sprickgenerering.

Beroende på om sprickor karteras längs en linje, exempelvis borrhål, eller på en yta, exempelvis tunnelvägg, erhålls olika mått av sprickintensitet. Borrhålskartering påvisar generellt sett högre intensitet än ytkartering, antagligen beroende på att det karteras sprickor med mindre storlek i borrhål än på ytor. Detta har även bäring på djuptrender, det vill säga om egenskaperna på de sprickor som karteras på håll är representativa för spricknätverket på djupet, vilket inte studerats på SKB i

någon större utsträckning sedan /25-162/. Genom en systematisk genomgång av i dag tillgängliga sprickdata från Äspölaboratoriet och från platsundersökningar kan sambandet mellan data karterade längs linjer och på ytor undersökas närmare. Ett samarbetsprojekt med Posiva (DEMO) har initierats vilket ska demonstrera vilka resurser och metoder som behövs för att konstruera depositionstunnlar och -hål för ett KBS-3V-koncept. Data från detta projekt kan öka förståelsen för sambandet mellan sprickor karterade i pilothål jämfört med vad som karteras på tunnelvägg.

I det pågående projektet med att ta fram en ny geologisk beskrivning av bergmassan i och runt Äspölaboratoriet, är ambitionen att inkorporera data från flera mätfält för att minska parameter-spannet och därmed utfallsrummet för den diskreta spricknätverksmodellen.

Att studera olika spricknätverksmodeller som framtagits för olika experiment på Äspölaboratoriet, kan ge en vägledning om hur olika modeller kan jämföras för att detektera skillnader eller likheter mellan två olika spricknätverksmodeller. En utveckling av ett verktyg som på ett enkelt sätt kan jämföra två DFN-modeller skulle inför framtiden minska osäkerheten om olika modeller bör propageras som varianter eller om de kan uppskattas vara tillräckligt lika för att antas omfattas av varandra.

En ökad integration mellan modeller som beskriver alla sprickor och de som beskriver dem som är flödande är önskvärt, det vill säga målet är att ha en DFN-modell, med kvantifierad variation och osäkerhet. Till sprickorna i denna modell kan egenskaper kopplas på ett sådant sätt att det är möjligt att särskilja de sprickor som har potential att bära flöde från dem som inte kan flöda, vilket resulterar i att sprickor som inte är aktiva i en viss delmodell kan släckas.

Sprickgeometrier som är beskaffade såsom i figur 25-2, det vill säga att flödesvägar är uppbyggda av flikiga kanaler i sprickplanen, resulterar i att kanalerna inte nödvändigtvis har kontakt med varandra då två sprickor korsas. Kopplingen mellan två kanaler, inom en spricka eller mellan två korsande sprickor, kan således vara obefintlig eller svag vilket ökar flödesresistiviteten och minskar sammanlänkningen av flödeskanalerna, vilket inte är fallet i dagens modeller. Genom fortsatta studier av egenskaper av sprickplanet, geometri på aperturfördelning, borde realism kunna uppnås för flöde och en sådan modell borde även en kunna uppskatta stagnanta volymer och flödesvätt yta.

De numeriska koder som i dag används inom SKB för generering av spricknätverksmodeller bygger på ungefär samma koncept, det vill säga sprickor genereras med läge, orientering, storlek och egenskaper momentant utifrån olika fördelningar. Alternativa metoder genererar endast sprickfrön som sedan med sannolikhetsfunktioner propagerar i modellvolymen enligt bestämda regler. En genomgång av alternativa koncept kan påvisa styrkor och svagheter i olika angreppssätt.

25.3.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 förekommer olika typer av modelleringar och modellutvecklingar som redovisas i olika delkapitel om bergets hållfasthet och deformationer. Ofta har de genomförda modellinsatserna behandlat kopplade frågeställningar som berört termisk utveckling, påverkan på hydrauliska egenskaper och mekaniska konsekvenser.

Myndigheterna kommenterade att för att bestämma förväntade förändringar av transmissivitet i sprickor i ett förvars närområde, vilka kan vara orsakade av byggande, termisk belastning, svällning av buffert eller ett glaciationsscenario, så bör SKB beakta möjligheten av ny sprickbildning, sprickpropagering och sammanbindning av existerande sprickor i närheten av deponeringshålen. SKI ansåg att nya sprickmönster från varje stegvis typ av belastning kan förändra flödet och transmissiviteten i närområdet till deponeringshålet. Detta skulle enligt SKI innebära att 3DEC-koden behöver modifieras för att kunna skapa termo-mekaniska närområdesmodeller.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Den nyvunna kunskapen om kopplad modellering (HM-, TM-, THM-kopplingar) kommenteras i de ovanstående processinriktade avsnitten om Gasströmning/gaslösning (avsnitt 25.2.4), Termisk rörelse (avsnitt 25.2.6), Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor (avsnitt 25.2.7), Sprickbildning (avsnitt 25.2.8) och Tidsberoende deformationer (avsnitt 25.2.9).

SKB har deltagit i projektet Decovalex 2011 som består av tre individuella delar: i) ventilations-experiment i en lertunnel i Mt. Terri, ii) Äspö pelarstabilitetsförsök, Apse och iii) flödestransport samt hydrogeologisk modellering av en vattentunnel i Tjeckien.

Apse-försöket har analyserats av sju olika modelleringsteam, bland annat ett från SKB. Den första delen av arbetet har fokuserat på att utveckla modeller som kan simulera enaxiella tryckhållfasthetsprov på borrhärdar. Stora framgångar har nåtts genom att använda modeller som simulerar bergets mineralsammansättning /25-163/. Nuvarande fokus för modelleringen av Apse är att trimma in kopplade TM-modeller för att kunna beräkna hur spänningen i pelaren förändras då den värms upp. Målsättningen är att bestämma spjälkhållfastheten i pelaren. Modellerna ska i ett senare skede med elasto-plastisk modellering försöka simulera geometrin på det brott som uppstod i pelaren. Detta kräver att förfinade materialmodeller kan implementeras i TM-modellerna.

Program

En viktig utgångspunkt i designfilosofin för Kärnbränsleförvaret i Forsmark kommer att vara tillämpningen av Observationsmetoden, se kapitel 15. För att kunna göra bättre prognoser för det förväntade termiska, mekaniska, och hydrauliska beteendet, är det nödvändigt att utveckla en modell som kan kalkylera parametrar som successivt kommer att mätas under förvarets byggnation. Detta är inte ett trivialt problem eftersom vi ofta kan mäta det vi inte kan kalkylera och tvärtom. Detta innebär att prediktions- och uppföljningsplaner måste utarbetas omsorgsfullt och med god förståelse för problemets art. Mot en sådan bakgrund är det bland annat av intresse att utveckla tillämpning av så kallade proxyparametrar (ungefär ställföreträdande parametrar) i modellering.

Med hänsyn till Observationsmetodens förutsättningar och för att kunna hantera olika bergmekaniskt kopplade frågeställningar är bevakning av beräkningsprogram som beskriver bergmekaniska skeenden i olika skalor en viktig löpande uppgift för SKB inom Berglinjen, se kapitel 15. Av speciellt intresse är den nya generationens beräkningsprogram som drivits fram av gruvbranschens behov för att förstå risken för brott i djupa dagbrott, eller för att få i gång och styra kontinuerliga brott i så kallad blockrasbrytning (mass mining). Denna typ av beräkningsprogram försöker beskriva bergmassans sammansättning från mikro- till makroskala, och brott kan beräkningsmässigt initieras i den svagaste länken, vare sig den består av sprickor eller intakt berg. Därmed är denna typ av beräkningsprogram på sikt av intresse även för analyser av brott på grund av jordbävning eller termisk rörelse inom ramen för säkerhetsanalysens studier av kopplade processer (THM).

SKB avser att genomföra ett program med nya beräkningskoder och resultatverifiering utifrån de unika databaser som upprättats i olika studier i Sverige eller internationellt, framför allt i samarbete med de olika projekt som Posiva bedriver i Onkalo. Målet med programmet är att försäkra sig om att de nyare modelleringsmetoderna har väsentliga fördelar i relation till nuvarande angreppssätt. Vidare ska programmet ge insikter om respektive modellkods begränsningar. Programmet ska ses som en övergripande utveckling av modelleringsstrategi för att kunna tillämpa bästa möjliga modellverktyg när undermarksarbetena startar i Forsmark.

SKB avser också att vidareutveckla de konceptuella antagandena om spännings-transmissivitets-samband för sprickor och deformationszoner, som nu används för att utvärdera resultat från mekaniska och termomekaniska simuleringar av förvarets utveckling.

Den hantering av portrycksöverskotten under ett glaciationsscenario som nu tillämpas baseras på kontinuummodeller med homogen hydraulisk diffusivitet. Detta överskattar troligtvis portrycken. SKB avser utveckla metoder för att ta hänsyn till den diskontinuerliga fördelning av transmissivitet och magasin-koefficient som finns i berggrunden.

SKB planerar att vidareutveckla DFN-modelleringen, se avsnitt 25.3.1. Denna vidareutveckling ska även beakta möjliga (T)HM-kopplade applikationer.

För jordskalvssimuleringarna planeras en utveckling av beräkningstekniken, se även avsnitt 25.2.7. Detta bör göras för att kunna använda resultaten av simuleringarna för att få uppfattning om vilken typ av skalv som är realistiskt möjliga givet trovärdiga postglaciala spänningstillstånd, mindre konservativa mekaniska egenskaper hos potentiella skalvzoner, portrycksförhållanden med mera. Med en utvecklad beräkningsteknik ska det vara möjligt att fördela hållfastheten (kohesionen) över

deformationszonens area i stället för att, som i de existerande modellerna, beskriva reduktionen av hållfastheten till en förbestämd residualhållfasthet. Brottet kan sedan initieras genom till exempel en porttryckshöjning och därefter tillåtas propagera spontant. Brottet ska sedan propagera så länge som den successivt överförda lasten är tillräcklig för att överskrida hållfastheten i brottonen.

Med målet att efterlikna typiska konceptuella sprickmönster som kan förekomma i Baltiska skölden avser SKB genomföra sprödtektoniska generiska modelleringar i en relativt homogen kristallin bergart. En typisk sprickkartering på hälltytor med kristallin berggrund innehåller i horisontalplanet vanligtvis fyra mer eller mindre utpräglade spricksystem som överlagrar eventuella foliations-sprickor eller förgnejsning. Spricksystemen är ett resultat av en tektonisk lasthistorik som kan avspegla varierande bergspänningsituationer alltsedan berggrunden bildades, det vill säga inklusive avsvainingsdeformationer, diverse orogenesers tredimensionella påverkan, kontinentaldriftens effekt och eventuellt nedisningars effekt i den betraktade berggrundsregionen. I den sprödtektoniska modelleringen ansätts randvillkor och lastfall för den betraktade berggrunden utifrån en tolkad huvudspänningshistorik. Projektet ska ses som en första ansats till en alternativ geometrisk beskrivning av tänkbara flödesmönster för berggrundvatten.

25.3.3 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling

Den enklaste hydrokemimodellen är beskrivning av den rumsliga fördelningen av halterna av de viktigaste lösta ämnena i bergvolymen. Fördelningarna av enskilda lösta ämnens halter kan i vissa fall indikera specifika pågående kemiska processer. Mer kunskap nås genom en statistisk bearbetning med multivariantanalys, 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. Dessa klasser utgör sedan en grund för fortsatta beräkningar av reaktioner och blandningsförhållanden /25-82/. De framräknade blandningsproportionerna och den verkliga uppmätta sammansättningen utgör grund för att beräkna omfattningen av reaktioner. För denna hydrokemiska modellering används koden M3 (Multivariate Mixing and Massbalance calculations) som har utvecklats med Matlab som bas /25-82, 25-83, 25-84, 25-85/. Resultatens rimlighet kontrolleras med alternativa modelleringar, till exempel geokemiska simuleringar med koden PhreeqC.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 presenterades inga planer för vidare utveckling av metoden. Tillämpningen av metoden planerades ske inom ramen för platsundersökningarna och säkerhetsanalyserna.

I granskningen uttryckte SKI en åsikt om att viss metodutveckling behövs inom detta område. SKI anser att SKB i samband med ansökan om KBS-3 systemet enligt miljöbalken i större utsträckning bör uppmärksamma risker för kemisk-toxisk påverkan på människors hälsa och miljön av exempelvis injekteringsmedel.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

SKB:s hydrogeokemiprogram för platskaraktärisering hade som mål att 1) ta fram representativa kvalitetssäkrade data som ska användas som indata i bedömningen av förvarets långsiktiga säkerhet, och 2) ge en förståelse av nuvarande opåverkade hydrogeokemiska villkor och av hur dessa kan ändras i framtiden. För dessa ändamål tog man fram olika hydrogeokemiska modeller för Forsmark och Laxemar /25-73, 25-74/. Modellerna inkluderade koncept baserade på kvalificering av fältdata, blandningsmodeller baserade på multivariat statistisk analys, modeller baserade på kemiska jämvikter, samt modeller där man försöker koppla grundvattenflöde med transport av ämnen och kemiska reaktioner. Vidare kalibrerades de hydrogeologiska modellerna för Forsmark och Laxemar genom jämförelser mellan beräknade resultat och kemiska fältdata /25-164, 25-15, 25-20/

Modeller som kopplar hydrogeologi med reaktiv transport har visat sig vara en av dem mest kraftfulla verktygen för att integrera hydrogeologi med hydrokemi. Storskaliga kopplade modeller av Laxemarområdet har integrerat kvantitativt hydrogeologiska effekter (det vill säga grundvattnets hastighet) beräknade med ConnectFlow, med komplexa geokemiska reaktionsmodeller av interaktionen mellan grundvatten och mineral /25-165, 25-166/. Beräknade resultat visar att ett

sådant tillvägagångssätt kan återge de viktigaste vattenkemiska trenderna som man har funnit i Laxemars platsundersökning

Kunskap inom detta område har fördjupats inom EU-projektet Funmig (Fundamental Understanding of radionuclide Migration). Av särskilt intresse var komponenten som handlade om processer och transport studier relevanta för djupförvar system i kristallina bergarter (RTDC 4: "Processes and transport studies relevant for crystalline rock disposal concepts"). Hydrogeokemiska data från både Laxemar och Forsmark användes i dessa integrerade projekt, och flera modelleringsmetoder testades /25-167, 25-168, 25-169, 25-170, 25-171/.

Program

Beskrivning av hur grundvattensammansättningen påverkas av havsvatteninträngning, permafrost, och nedisning kommer att redovisas inom projektet SR-Site. Kopplingen mellan hydrogeologi och hydrogeokemi kommer att göras på sätt som liknar metoden som utvecklades för SR-Can /25-80, 25-81, 25-79/.

Den huvudsakliga begränsningen för modellerna som kopplar grundvattenflöde med transport av ämnen och kemiska reaktioner är att de konstitutiva ekvationerna som ligger till grund är överlag icke-linjära. Detta innebär långa beräkningstider och/eller stora krav på minnesallokering, och därmed stora kostnader. Detta medför att kopplade modellproblem vanligtvis löses genom överförenklade geometrier och förenklade hydrogeologiska och kemiska antaganden. Nya angreppssätt krävs därför för att komma vidare. Möjliga vägar kan innebära antingen utnyttjande av effektiva beräkningsgeometrier eller effektiva geokemiska formuleringar som reducerar komplexiteten och den icke-linjäritet som kännetecknar processerna som beskriver interaktionen mellan berg och grundvatten.

Effektiva geometriska lösningar för modeller som integrerar hydrogeologi och vattenkemi kan uppnås genom strömlinjesimulatorer, där man lägger till de geokemiska processerna längs flödeslinjer som beräknats med de hydrogeologiska modellerna. Ytterligare forskning och utveckling kan behövas i framtiden för att lägga till blandningsprocesser mellan olika strömlinjer samt motsvarande dispersion. Å andra sidan kan reaktiv transportexperiment vid Äspölaboratoriet vara användbara för att testa dessa modeller i framtiden.

25.3.4 Integrerad modellering – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskriver SKB planerna att slutföra True-projektet och förväntar sig bland annat kunna använda resultaten för utvärderingen av Swiw-testerna i samband med platsundersökningarna. I programmet ingick tester och utveckling av koderna Marfa och ConnectFlow, samt utveckling av koder för reaktiv transportmodellering. Transportmodellering med Mike She skulle fortsätta för att öka förståelsen av transport i de ytnära jordlagren.

I granskningen bedömer SKI att det av SKB redovisade programmet är ändamålsenligt, men de efterfrågar större tydlighet om hur resultat från retentionsförsök utförda under begränsad tid ska föras över till transportmodeller för långsiktig säkerhet.

Vidare ansåg SKI att programmet för radionuklidtransport i geosfären bör kopplas tydligare till motsvarande program för biosfären.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

SKB har deltagit i EU-projektet Funmig (Fundamental Understanding of radionuclide Migration; www.funmig.com). Av specifikt intresse för SKB var RTDC nummer 4 (Processes and transport studies relevant for crystalline rock disposal concepts). Ökad förståelse av processer kopplade till transport av radionuklider har uppnåtts inom projektet.

Inom Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (TF GWFTS) har Task 6 (Performance assessment modelling using site characterisation data) avslutats. Slut-

satserna av övningen har publicerats i ett antal bidrag i en sammanhållen vetenskaplig publikation /25-172, 25-173/. Vidare har ett antal utvalda modelleringsbidrag publicerats i samma nummer; SKB:s bidrag beskrivs i /25-174/. Den viktigaste slutsatsen är att det inte rakt av går att använda retentionsparametrar utvärderade från spårämnesförsök i fältskala i säkerhetsanalysapplikationer. Detta beroende på att man under den aktuella tidsskalan för spårämnesförsöket mäter främst egenskaperna för bergvolymen närmast sprickytorna, medan under de tidsskalor som är aktuella för säkerhetsanalysen aktiveras även djupare delar av bergmatrisen. En utökad diskussion kring denna aspekt och dess implikationer diskuteras i /25-175/. Denna rapport svarar på myndigheternas frågor kring hur resultat från retentionsförsök utförda under begränsad tid (månader-år) ska föras över till transportmodeller för långsiktig säkerhet.

Utvecklingen av beräkningskoden Marfa har fortsatt och resulterat i två separata versioner; en för icke-transient flöde och en för transient flöde /25-176/. Marfa används inom SR-Site för att analysera specifikt effekten av retention i tunnlar på transport av radionuklider, samt eventuellt även för att analysera radionuklidtransport i transienta flödesfält (orsakade av till exempel strandlinjeförskjutning eller glaciala cykler). Metodiken på vilken Marfa bygger, det vill säga en time-domain random walk, har även publicerats vetenskapligt i /25-177/. I Marfa finns en möjlighet att applicera en uppskalningsalgoritm för delar av domänen där explicit sprickstatistik saknas, baserat på transport-simuleringar i mindre sprickdomäner. Även en alternativ metod för uppskalning av transport baserat på data av spricksegment har utvecklats och finns presenterad i /25-178, 25-179/.

De så kallade Swiw-testerna som gjorts inom ramen för platsundersökningar och platsmodellering har utvärderats och rapporterats i /25-180/. Försöken bekräftar att retention sker i fält, vidare att den relativa sorptionen mellan olika spårämnen är konsistent med laborieförsök. True-försöken är avslutade och är inne i en publiceringsfas. Spårämnesförsöken i en enskild spricka, True-1, är sammanfattade i en serie om tre artiklar /25-181, 25-182, 25-183/. Resultaten indikerar att de experimentella True-1 resultaten kan förklaras med en retentionsmodell baserad på endimensionell diffusion in i en infinit matris. Retentionsegenskaperna i det omvandlade berget närmast sprickan är betydligt starkare än vad laboriemätningar på oomvandlat material indikerar.

Spårämnesförsöken i ett spricknätverk, True Block Scale, har också sammanfattats i en artikelserie /25-184, 25-185/ i vilken försöket och modelleringen presenteras och spricknätverkssimuleringar och retentionsmodeller beskrivs. Effekten av heterogenitet i den ytliga delen av matrisen, den så kallade rim zone, har även analyserats i /25-186/.

Modeller som kopplar hydrogeokemi och radionuklidtransport har utvecklats och testats, specifikt koden Fastreact. Detta arbete redovisas inom ramen för SR-Site. Metodiken bygger på användandet av strömrör (streamtubes) som erhålls från hydrogeologisk modellering, se avsnitt 25.2.3. Längs med strömtuben löses ett antal komplexa geokemiska reaktioner, som i sin tur påverkar retentionen av radionuklider. Fördelen med denna metodik är att den är snabb då enbart strömrör av intresse behöver analyseras, det vill säga de grundvattenkemiska reaktionerna behöver inte lösas i hela domänen, samt att heterogenitet lätt analyseras då multipla strömtuber introduceras. Metoden kan användas både för att analysera transport från förvaret, samt transport i de kvartära avlagringarna.

Program

Vidareutveckling av koden Marfa fortsätter. En bedömning ska göras om ytterligare retentionsprocesser ska inkluderas. Möjlig utveckling innefattar bland annat transport med kolloider, diffusion in i stagnant vatten med åtföljande matrisdiffusion, samt uppdelning av matrisen i lager med olika egenskaper. I SR-Site används Marfa redan som beräkningsverktyg för transport av radionuklider med kolloider, men dessa kolloidprocesser är inte formellt inkorporerade i Marfa, utan hanteras via specialversioner av koden. Vidare kommer Marfa att användas i olika applikationer och i kommande säkerhetsanalyser.

Ett spårämnesförsök, Swiw med syntetiskt grundvatten, planeras att utföras i Äspölaboratoriet. Det syntetiska grundvattnet injiceras i bergformationen och pumpas sedan tillbaka. Ökningen av de naturligt förekommande spårämnena i det tillbakapumpade vattnet kan sedan analyseras och ge information om dominerande diffusionsprocesser i spricksystemet. En förberedande modelleringsstudie har utförts och redovisats i /25-187/; denna visar att experimentet bör vara möjligt att genom-

föra. Om detta experiment kombineras med injicering av vanliga spårämnen bör man kunna särskilja diffusionsprocesser kopplade till utbyte med stagnant vatten i sprickplanet och diffusionsprocesser kopplade till utbyte med matrisen.

Utveckling av reaktiv transportmodellering, det vill säga kopplad hydrogeokemisk och radionuklidtransportmodellering, fortsätter. Modellen Fastreact, baserad på strömrörskonceptet (se Nyvunnen kunskap ovan), är ett exempel på en sådan modell. Effekterna av den rumsliga variabiliteten i sprickmineralsammansättning är av särskilt intresse. Dataunderlag för detta finns från platsundersökningarna, och slutrapportering av detta arbete kommer att ske inom ramen för SR-Site. Den kunskap som kommer fram genom utvecklingen av processororienterad sorptionsmodellering, se avsnitt 25.2.15, kan på sikt även integreras i den reaktiva transportmodelleringen.

I förlängningen kan den integrerade transportmodelleringen sammanhållet hantera transport av radionuklider med hänsyn till hela systemet, det vill säga grundvattenflöde, geokemiska reaktioner och radionuklidtransport i både geosfär och biosfär. Fördelningen av strömrör, från kapsel till biosfär med associerade parametrar (advektiv gångtid, flödesrelaterat transportmotstånd), kommer då från grundvattenflödesmodeller som innehåller en detaljerad beskrivning av bergets flödesegenskaper, se avsnitt 25.2.3. I princip kan strömrören påbörjas i en modell för det djupa berget och sedan fortsätta i en mer detaljerad grundvattenflödesmodell av ytsystemet såsom beskriven i Mike She. Längs med strömrören löses geokemiska reaktioner samt radionuklidtransport.

26 Ytnära ekosystem

Ytnära ekosystem omfattar lösa avlagringar (jordlager och sediment), ytligt grundvatten, ytvatten, landytan och den undre delen av atmosfären. Konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från ett slutförvar för använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall, i form av en stråldos till människor, djur och växter, uppkommer när radionuklider omsätts i dessa ekosystem. Beräkningar av radionuklidens ackumulation och omsättning i ytnära ekosystem, och av de risker som är förknippade med ett utsläpp, är därför en viktig del av säkerhetsanalysen. De beräknade strålriskerna används dels för att bedöma om myndigheternas krav på säkerhet (så kallade gränsvärden) för människors hälsa och miljön är uppfyllda, dels som en måttstock för att jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller platser. Trovärdiga beräkningar kräver att händelser och processer i ekosystemen 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, hydrologiska och geologiska randvillkor för det underliggande berget.

Det övergripande målet med forsknings- och utvecklingsprogrammet för ytnära ekosystem är att utifrån en vetenskaplig kunskapsbas beskriva de från radiologisk synpunkt viktigaste processerna och företeelserna i ekosystemen, samt att utveckla metodik och modeller som kan användas för att bedöma långsiktiga radiologiska risker för människor och andra organismer i samband med slutförvaring av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall.

För planeringen av forskning och utveckling när det gäller ytnära ekosystem under den kommande programperioden har SKB utgått från slutsatserna av Fud-program 2007, från myndigheternas kommentarer på programmet, samt från insikter som vunnits vid platsbeskrivningen och vid den pågående (2010) säkerhetsanalysen SR-Site. Programmet har utformats med tanke på de krav som kommande säkerhetsanalyser, för såväl driftsatta som planerade förvarsanläggningar, kommer att ställa på beskrivningen av transport och ackumulation av radionuklider i ytnära ekosystem.

26.1 Översikt av programmet

Forskningsprogrammet för ytnära ekosystem har delats upp i ett antal forskningsområden. Dessa är terrestra ekosystem (avsnitt 26.3), akvatiska ekosystem (avsnitt 26.4), biogeokemi (avsnitt 26.5), hydrologi och transport (avsnitt 26.6), effekter av långtidsvariationer (avsnitt 26.7), landskapsutveckling och avlagringar (avsnitt 26.8) samt radionuklidmodellering (avsnitt 26.9). Dessa forskningsområden beskrivs i detalj senare i kapitlet. Nedan följer en sammanfattning av hela forskningsprogrammet.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Tyngdpunkten i Fud-program 2007 för ytnära ekosystem låg på att öka radiologisk processkunskap med utgångspunkt från platsundersökningarna av Forsmark och Laxemar-Simpevarp /26-1/. En fortsatt insamling och analys av plats-specifika data planerades, eftersom detta är en grundförutsättning för framtagandet av numeriska beskrivningar av platserna. En genomgång av den aktuella vetenskapliga litteraturen skulle enligt planerna löpa parallellt med detta arbete. Vidare identifierades behovet av att vidareutveckla de modeller som används för att bedöma radiologisk risk med utgångspunkt från transport, ackumulation och biologiskt upptag. Målet för utvecklingen var en metodik som kan beskriva exponering för samtliga intressanta radionuklider, som omfattar effekter på både människan och miljön, och som speglar aktuell kunskap från de undersökta platserna med avseende på landskapsutveckling och människans bruk av naturresurser. En omfattande känslighetsanalys av modelleringsresultaten planerades, liksom en förbättrad beskrivning av permafrostförhållanden på undersökningsplatserna. Programmet betonade också vikten av ett fortsatt nationellt och internationellt samarbete, samt betydelsen av att sprida nyvunnen kunskap genom vetenskaplig publicering och aktivt deltagande i konferenser och seminarier.

Vid granskningen av Fud-program 2007 var dåvarande SSI expertmyndighet för biosfärområdet. SSI ansåg att SR-Can belyst hur kunskapen från biosfärprogrammet omsatts i säkerhetsanalysen, och deras granskning av biosfärprogrammet byggde därför i stor utsträckning på den tidigare granskningen av SR-Can /26-2/. SSI ansåg att dosberäkningar som baserades på SR-Can-metodiken innebar ett klart framsteg i utvecklingen av säkerhetsanalysen, men noterade en rad brister som behövde åtgärdas inför ansökan om slutförvaret. Bland annat pekade myndigheterna på att metodiken i SR-Can gav en utspädning i dosberäkningarna, att vissa transportprocesser saknades, att valideringen av underliggande modeller mot fältdata var bristfällig, samt att en osäkerhetsanalys saknades. Ett klagörande av hur SKB tar hand om myndigheternas synpunkter på tidigare forskningsprogram och säkerhetsanalyser i det fortsatta programmet efterlystes också.

Även Kärnavfallsrådet ansåg i sin granskning att biosfärprogrammet tagit ett viktigt steg framåt i och med utvecklingen av platsspecifika modeller som beskriver transport och ackumulation av radioaktiva ämnen med hänsyn till landskapets förändringar i tid och rum. Rådet välkomnade de fortsatta och intensifierade satsningarna inom biosfären och ansåg att programmet kommer att vara ett viktigt stöd för såväl säkerhetsanalysen som MKB-processen. Rådet efterlyste emellertid en tydligare belysning av hur resultaten av arbetet kommer att integreras i säkerhetsanalys och MKB, och vilken betydelse bedömningar av biosfären kommer att få för lokaliseringen av ett slutförvar. Vidare ansåg rådet att SKB bör ta fram känslighetsanalyser av modelleringsresultaten, samt utarbeta ett program för modellering av förhållandena vid en förväntad klimatiförändring på grund av växthuseffekten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Sedan Fud-program 2007 har kunskapen om ytnära ekosystem vuxit och metodiken för att bedöma radiologiska risker vidareutvecklats. De största framstegen har skett inom ramen för arbetet med platsmodelleringen av Forsmark och Laxemar-Simpevarp och säkerhetsanalysen SR-Site. Insamling och analys av platsspecifika data har genererat ny kunskap om ytnära ekosystem, vilken har tillämpats i numeriska beskrivningar av platserna /26-3, 26-4/.

I och med detta arbete har SKB utvecklat konceptuella och numeriska modeller som beskriver ekosystemen och transport av vattenburna element i ytnära ekosystem. Modeller av vegetationsutbredningen på land och i havet och av ythydrologiska flöden har validerats genom jämförelser med fältdata. Beskrivningen av platserna har kompletterats med modeller för landskapsutveckling och ekosystemsuccesion, under olika antaganden om framtida klimat och markanvändning. Metodiken för att beräkna transport och ackumulation av radionuklider i landskapet och för att bedöma risken för människors hälsa och för miljön har också utvecklats. Beräkningarna bygger i stor utsträckning på befintlig kunskap om Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Resultaten som framkommit har publicerats i drygt 50 SKB-rapporter och i mer än 30 vetenskapliga artiklar, och dessutom presenterats vid konferenser, seminarier och universitetskurser.

Program

Forskning och utveckling under den kommande programperioden kommer att bygga vidare på pågående aktiviteter och innefattar studier för att öka processförståelse samt utveckling av beräkningsmetodik. Känslighets- och osäkerhetsanalyser av beräkningarna pågår. Stor vikt kommer att läggas vid frågeställningar och osäkerheter som identifierats i pågående och kommande säkerhetsanalyser. Nya insatser planeras för att förbättra beskrivningen av akvatiska och terrestra ekosystem och övergången mellan dem i ett landskap under utveckling.

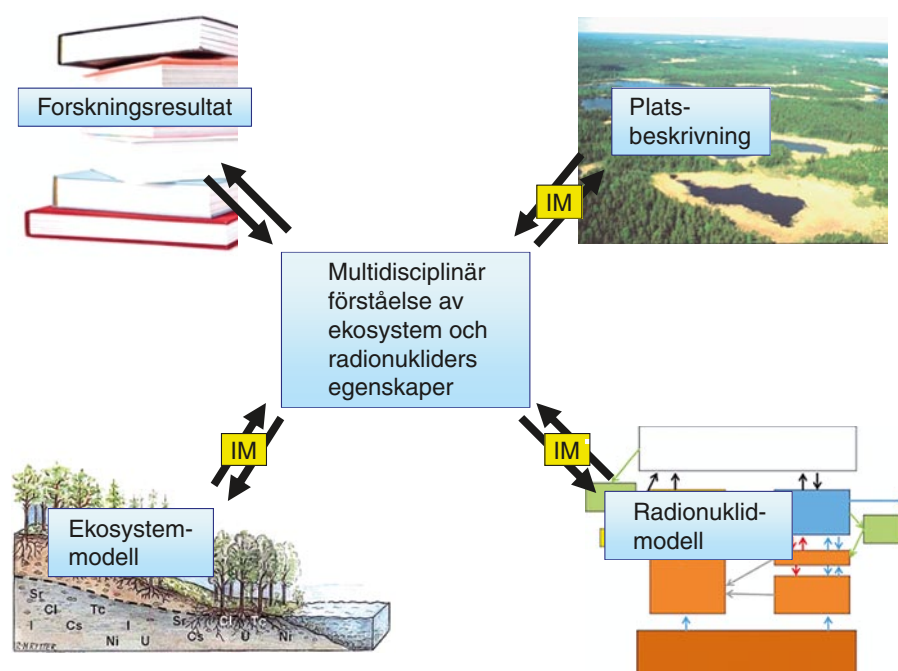
26.2 Utgångspunkter för beskrivning och modellering av ytnära ekosystem

En central del i SKB:s forskningsprogram för ytnära ekosystem har alltsedan slutet av 1990-talet varit att identifiera, beskriva och kvantifiera processer, som ur ett radiologiskt perspektiv kan vara viktiga. Angreppssättet är systemekologiskt, där hänsyn tas till både biotiska och abiotiska processer i ekosystemen. En säkerhetsanalys för ett slutförvar görs för långa tidsperspektiv och varierande miljöer, vilket ofta kräver generaliseringar av kunskaper som genererats inom den akademiska världen.

I forskningsprogrammet uppdateras kunskapen om de viktigaste processerna kontinuerligt med aktuella forskningsrön och slutsatser från SKB:s egna undersökningar. Resultaten från platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har starkt bidragit till att öka förståelsen av viktiga processer i ytnära ekosystem (se till exempel /26-3/ och /26-4/). Dessutom sker en aktiv kunskapsåterföring från tidigare säkerhetsanalyser, och den samlade kunskapen tillämpas sedan på den tids-, rums- och detaljeringsnivå som krävs i kommande säkerhetsanalyser.

Varje ekosystem karaktäriseras av ett stort antal processer och komplexa interaktioner. I en säkerhetsanalys är det dock få processer som spelar en kvantitativt avgörande roll. Därför kan den numeriska modell som används i säkerhetsanalysen avsevärt förenklas och anpassas till ett lämpligt tids- och rumspektiv. Genom att använda ett systematiskt tillvägagångssätt för att identifiera de processer som är viktiga för strålningsdos till människa och biota, kan modellen förenklas och förenklingarna motiveras. Ett sätt att göra det är att upprätta en interaktionsmatrix /26-5/. I en interaktionsmatrix delas det aktuella systemet upp i olika delar, när det gäller ytnära ekosystem både abiotiska (till exempel kvartära avlagringar och ytvatten) och biologiska komponenter (till exempel primärproducenter och konsumenter). Därefter identifieras interaktioner mellan systemets olika delar, och dessa bedöms med utgångspunkt från den potentiella betydelsen för dos till människa eller miljö.

En interaktionsmatrix för biosfären utvecklades av SKB i början av 2000-talet /26-6/. Denna interaktionsmatrix har utgjort ett verktyg vid utformningen av platsundersökningsprogrammen och av ekosystemmodeller. Den används också för att stämma av att alla processer som identifierats som viktiga ur ett dosperspektiv inkluderas i de radionuklidtransportmodeller som tas fram inom biosfärprogrammet. Dessa tre komponenter; platsbeskrivning, mekanistiska ekosystemmodeller och modeller för radionuklidtransport, utgör tillsammans med resultat från olika forskningsprojekt de viktigaste delarna i det långsiktiga, iterativa arbetet med att öka processförståelsen, se figur 26-1.



Figur 26-1. Illustration av det långsiktiga, iterativa arbetet med att identifiera och utveckla förståelsen för viktiga processer i ytnära ekosystem. En första version av interaktionsmatrisen (IM) utgjorde ett viktigt underlag för utformningen av platsundersökningsprogram, ekosystemmodeller och modeller för radionuklidtransport. Var och en av de olika komponenterna genererar ny kunskap och nya frågor som används för att utveckla de övriga komponenterna.

I granskningen av Fud-program 2007 saknade SSI en samlad beskrivning av processer som är relevanta för att ta fram de modeller som används för att beräkna doser i säkerhetsanalysen. Som respons på detta har SKB tagit fram ekosystemspecifika interaktionsmatriser för limnisk, marin och terrester miljö, baserat på den generella interaktionsmatrisen för biosfären. Preliminära versioner av dessa för de limniska och marina systemen har redovisats /26-7, 26-8/. I samband med avrapporteringen inför SR-Site kommer uppdaterade versioner av ekosystemspecifika interaktionsmatriser att presenteras, medan definitioner av de identifierade processerna kommer att presenteras i en egen rapport.

I kommentarerna till Fud-program 2007 efterfrågade myndigheterna också rutiner för hantering av myndighetssynpunkter samt för versionshantering av modellkoder och data. Vid genomförandet av SR-Can implementerades Subversion (<http://svnbook.red-bean.com>), ett versionshanteringssystem för rapporttexter, indata, härledda parametrar, modeller och resultat. Under arbete med projektet SR-Site har Subversion kompletterats med Trac (<http://trac.edgewall.org/>), som är ett ärende- och felhanteringssystem. I Trac dokumenteras alla myndighetssynpunkter som rör biosfären i samband med granskningarna av SR-Can, Fud-program 2007 och SAR-08, tillsammans med SKB:s hantering av frågorna i en spårbar åtgärdskedja.

26.3 Terrestra ekosystem

SKB:s beskrivning av de terrestra ekosystemen omfattar områden där grundvattenytan ligger under eller nära markytan under en stor del av året. De terrestra ekosystemen spänner alltså över många olika biotoper, från väl-dränerad jordbruksmark, över torrare och fuktiga skogstyper, till våtmarker. Djupt grundvatten når de övre jordlagren framför allt i landskapets lågpunkter. Radionuklider tas i huvudsak upp i växter via rötterna och kan till exempel genom primärproduktion ackumuleras i biomassa. Denna biomassa utgör för flertalet element den viktigaste exponeringskällan för människor och växtätande djur. Sekundärt sker även en ackumulation av vissa radionuklider i den övre delen av jordprofilen via rot- och fallförna. Ackumulation av organiskt material, och av radionuklider associerade till detta, blir störst i våtmarker där det periodvis råder mer eller mindre syrefria förhållanden, vilket förhindrar nedbrytning och orsakar torvbildning. Radionuklider kan även sorberas i våtmarker när grundvattnet rinner igenom dem.

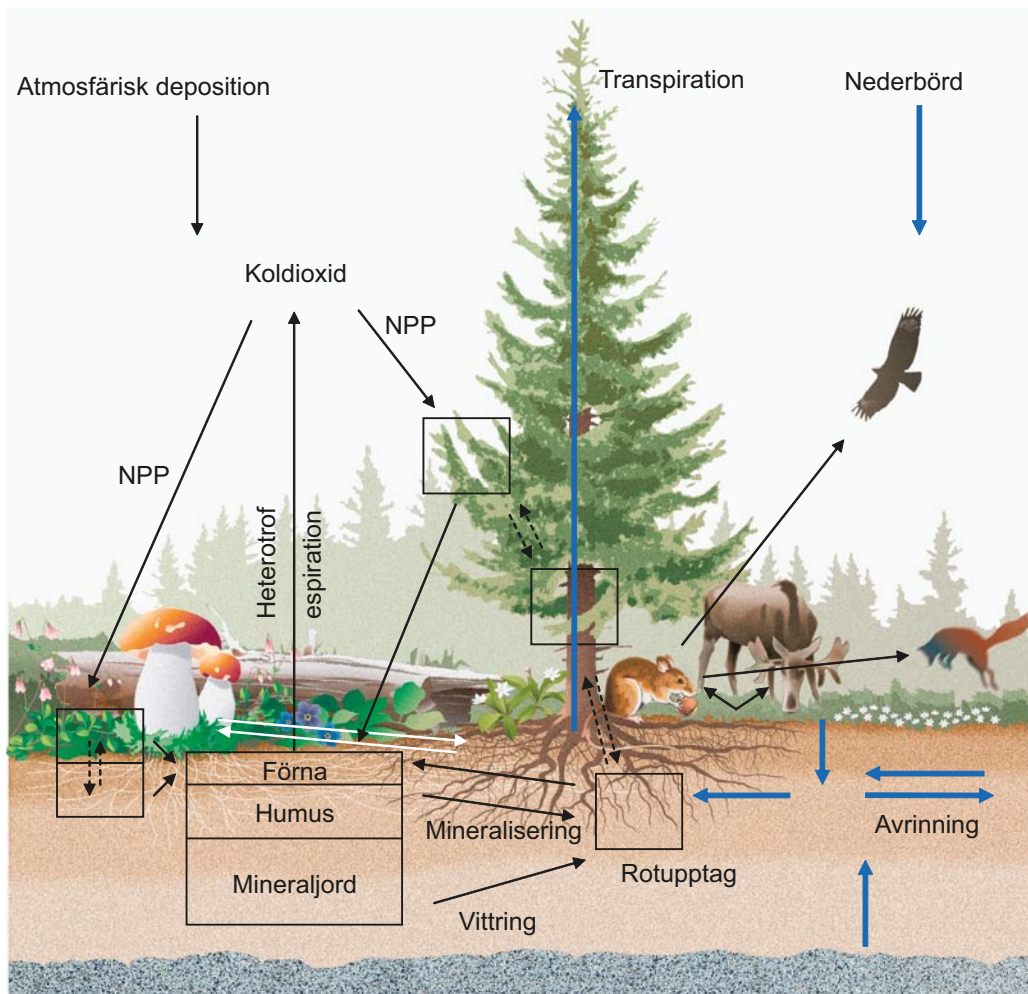
Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 identifierades behovet av en noggrannare beskrivning av terrestra biosfärprocesser, som till exempel nedbrytning och omsättning av organiskt kol i rotzonen, med utgångspunkt från platsundersökningarna. Programmet uttryckte också en ambition om riktade studier av våtmarker som gränsar till sjöar, se avsnitt 26.6. Nyckelprocesser för transport och ackumulation av radionuklider i terrestra system skulle identifieras med datorsimuleringar (Coup-modellen, se nedan) och nyvunnen kunskap användas för att vidareutveckla metodik för beräkningar av aktivitetskoncentration i terrestra system. I SSI:s granskning efterlystes en tydligare tillämpning av nyvunnen kunskap, samt en tydlig plan för den fortsatta utvecklingen av modeller som beskriver transport och ackumulation av radionuklider i olika typer av våtmarker. Kärnavfallsrådet ansåg att kunskaperna om jordbruksmarken bör fördjupas, särskilt när det gäller framtida uppodling av tidigare ackumulationsbottnar i vattendrag, sjöar och hav, samt användande av myrmark.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007

De senaste årens undersökningar har resulterat i en rad nya insikter om omsättning och ackumulation av organiskt material, och om fördelning av element i de terrestra ekosystemen i Forsmark och Laxemar-Simpevarp, se figur 26-2. Detta har sammanfattats i /26-9/.

Mängden och omsättningen av levande och död biomassa varierar starkt mellan olika typer av skogar och våtmarker på platserna, och variationen kan även vara stor mellan olika år /26-9/. Framför allt är det variationerna i markens vattenmättnad som påverkar nedbrytningen och därmed ackumulationen av organiskt material i fuktigare miljöer. Beräkningarna av kolomsättning på platserna bygger bland annat på mätningar i fält av markrespiration /26-10, 26-11/, av produktion och nedbrytning av trädförna /26-12/, samt av fördelningen och omsättningen av finrötter /26-13, 26-14, 26-15, 26-16/.



Figur 26-2. Konceptuell modell av ett landekosystem. Fyrkanter representerar förråd av organiskt material, och pilar elementflöde som är knutna till flödet av kol (svart) eller vatten (blå). Streckade pilar representerar transport inom växter. NPP = nettoprimärproduktion (figuren modifierad från /26-9/).

I ett samarbete med Lunds universitet utnyttjades en dynamisk vegetationsmodell (LPJ-GUESS) för att beskriva förråd och flöden av kol i olika ekosystem (vegetationstyper) /26-9/. Modellresultaten överensstämde väl med fältdata som samlats in under platsundersökningarna. Kolets kretslopp beskrevs för hela avrinningsområden genom att kombinera platsdata och resultat från datorsimuleringar. Beräkningarna visade att människans bruk av naturresurser påverkar både produktion och ackumulering av organiskt kol.

En storskalig kartläggning av primärproduktionen i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har gjorts som en del av platsundersökningarna. I ett separat samarbetsprojekt med Lunds universitet kombinerades fältdata med vegetationsmodellering och satellitinformation /26-17/, för att upprätta en geografisk beskrivning av primärproduktionen /26-18/. Den skattade primärproduktionen överensstämde i genomsnitt väl med fältobservationer och har bland annat använts för att uppskatta den rumsliga variationen.

Variationer i vegetationsutveckling, biomassa och primärproduktion har beskrivits för skog under fri utveckling (400 år) och för jordbruksmark (under 100 år), med hjälp av datorsimuleringar som styrs med regionala klimatdata från en 100-årsperiod /26-9/. Skogen nådde en jämvikt med avseende på nettoprimärproduktionen (NPP) efter cirka 150 till 200 år. Produktionsskogar hålls som regel vid en hög NPP genom avverkning. Den modellerade variationen i NPP för jordbruksmark var lägre än den som observerades i fält. För att illustrera vegetationen i Forsmark under periglaciala förhållanden och under förhållanden med varmare klimat än i dag har liknande datorsimuleringar använts /26-19/.

Populationer av däggdjur och fåglar i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har följts under platsundersökningarna /26-20, 26-21, 26-22/, och när det gäller älgpopulationerna har även årlig jaktstatistik använts /26-23, 26-24, 26-25/. De flesta populationerna har varit stabila mellan inventeringstillfällena, men populationer av vildsvin, räv och ekorre har ökat i alla inventerade områden. Vid platsundersökningarna har bioturbation av daggmack och myror undersökts på nitton olika lokaler i olika vegetationstyper, från väldränerad tallskog till gransumpskog /26-26/. Lokalerna uppvisade en stor variation i populationstätheter. Den beräknade omsättningshastigheten av humusskiktet uppvisade enligt undersökningen en samvariation med grundvattennivå och pH.

Fördelningen av ett stort antal element i olika skogsekosystem har studerats i ett samarbetsprojekt med högskolan i Kalmar /26-27/. Fördelningen av ett urval av element i växter har studerats för samma ekosystem /26-9, 26-28, 26-29/, se avsnitt 26.5.

Modelleringsstudier har använts för att identifiera nyckelprocesser för ackumulation av radionuklider i skogsekosystem. I ett samarbete mellan SLU och KTH har Coup-modellen, en mekanistisk skogsekosystemmodell, kompletterats med en modul för att följa spårämnen från ett utsläpp till grundvattnet /26-30/. Enligt datorsimuleringarna uppvisar torrare skogar, belägna högre i terrängen, en begränsad ackumulation av utsläppta radionuklider. Detsamma gäller för sumpskogar med ett passivt växtupptag av spårämnen. Ackumulationen under dessa förhållanden sker främst i djupare jordlager och styrs primärt av markens sorptionsförmåga. Stor ackumulation i humuslagret förekommer i sumpskogar, och ökar med faktorer som gynnar växtupptaget (till exempel aktivt upptag, stort rotdjup och en låg sorption).

Program

De senaste årens nyvunna kunskap bekräftar betydelsen av våtmarkerna som recipienter för radionuklider vid ett eventuellt utsläpp från ett slutförvar, se avsnitt 26.6. Vi kommer i det fortsatta programmet att sträva efter att fördjupa förståelsen av transport och ackumulation av radionuklider i våtmarker, samt i organogena jordbruksmarker. Nyvunnen kunskap kommer att utgöra ett underlag för att uppdatera SKB:s metodik för att beräkna aktivitetskoncentrationer och exponering, och för att minska osäkerheter i beskrivningen av nyckelfaktorer vid dessa beräkningar.

I det kommande programmet planerar vi en utökad beskrivning av egenskaper som karakteriserar våtmarker över en tänkt successionsgradient från kust till inland. Beskrivningen kommer också att kompletteras med modelleringsstudier av upptags- och ackumulationsprocesser i våtmarker.

Förtäring av kontaminerade jordbruksgrödor utgör en viktig källa till mänsklig exponering för många radionuklider. Därför kommer möjligheterna att utnyttja våtmarker för jordbruksproduktion att studeras närmare. Viktiga frågor är hur ackumulerade radionuklider omsätts när en våtmark dikas ut och hur länge ett uthålligt jordbruk kan bedrivas på en utdikad våtmark. Utveckling av en mekanistisk beskrivning av hur radionuklider tas upp i grödor planeras, se avsnitt 26.5. I samband med detta kommer SKB att genomföra en litteraturstudie som kommer att ligga till grund för att planera och utföra de kompletterande fältprovtagningar och modelleringar som eventuellt kommer att behövas.

26.4 Akvatiska ekosystem

De akvatiska ekosystemen utgörs av vattendrag, sjöar och hav. Dessa är normalt belägna i lågpunkter i landskapet och de utgör därmed potentiella utströmningsområden för djupt grundvatten som skulle kunna bli kontaminerat av radionuklider från ett slutförvar. Dessutom sker den huvudsakliga ämnestransporten i biosfären med hjälp av vatten, vilket gör att så gott som alla rörliga ämnen som finns i det terrestra systemet förr eller senare kommer att hamna i ett akvatiskt system. Därför kommer akvatiska system att vara centrala när det gäller att bedöma effekter av potentiell frigörelse av radionuklider från ett slutförvar. Radionuklider som når ett akvatiskt system kan tas upp av organismer, bindas in i sedimenten, avges till atmosfären eller transporteras vidare nedströms. Upptag av radionuklider i akvatiska organismer utgör en exponeringsväg för dos till människa, i och med att akvatiska organismer av olika slag utgör föda.

I många potentiella utströmningsområden kommer radionuklider från slutförvaret att passera ett sedimentlager. Sedimentens genomsläpplighet påverkar spridnings- och spådningsmönster, och adsorptionprocesser gör att olika ämnen kan komma att ackumuleras i sedimenten. För vissa radionuklider kan vi alltså förvänta oss en betydligt högre koncentration i sediment än i vatten, och sediment kan utgöra en viktig exponeringsväg för vattenlevande organismer. Kortsiktigt kommer ackumulation i sediment troligen att minska utflödet av radionuklider till vattenmassan och ge lägre exponering för människor. Långsiktigt kan däremot frisättande av tidigare ackumulerade radionuklider i samband med till exempel resuspension eller landhöjning/uppodling ge förhöjda doser under en begränsad period.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 fastställdes att kunskapsläget om de dominerande processerna för ackumulation och transport av olika ämnen i akvatiska miljöer är relativt goda. Det konstaterades att det viktigaste arbetet som kvarstod var att utveckla modeller och modellverktyg som kan hantera kunskapen och att samla in data från platserna. Inför SR-Site planerades att den tillgängliga kunskapen från platserna skulle sammanställas i en rapport om sjöar och vattendrag och en rapport om havet. En vidareutveckling av dosmodeller för sjöar planerades, liksom en specialstudie av våtmarker vid kanten av sjöar med avseende på interaktioner mellan sjöar och omgivande våtmarker på grund av vattenståndsvariationer i sjöarna, se avsnitt 26.6 för nyvunnen kunskap.

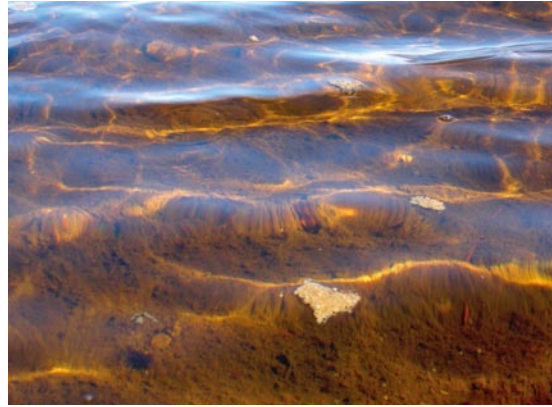
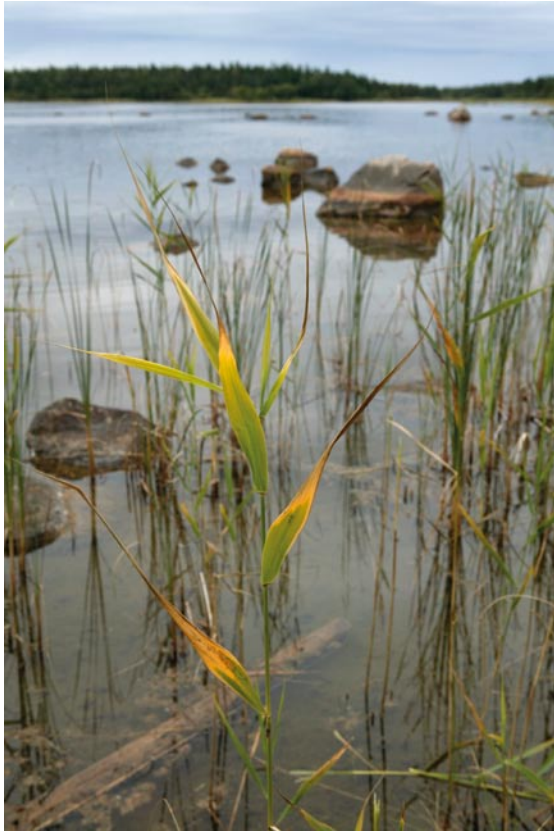
SSI uttryckte i granskningen en avsaknad av konkreta planer för vidareutvecklingen av dosmodeller för sjöar och ansåg det därmed svårt att bedöma hur väl SKB:s program inom detta område besvarar myndigheternas kommentarer på SR-Can.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2007

För att öka förståelsen av viktiga processer i de akvatiska ekosystemen har kompletterande fältundersökningar genomförts inom platsundersökningsprogrammet sedan Fud-program 2007. Dessutom har modeller för att beskriva viktiga flöden av organiskt kol och ett antal andra ämnen utvecklats. Kunskapen om de akvatiska systemen i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har sammanställts i två rapporter, en för sjöar och vattendrag /26-82/ och en för havet /26-92/.

Kolflödesmodellerna visar att de flesta Forsmarkssjöarna är nettoautotrofa, det vill säga att primärproduktionen är större än respirationen, se figur 26-3. På detta sätt skiljer de sig från de flesta andra sjöar i tempererade områden, vilka vanligen är dominerade av respiration och i större utsträckning försörjs av organiskt material från det omgivande tillrinningsområdet. Endast en mindre andel av det kol som fixeras av primärproducenter i sjöarna (7–10 procent) förs vidare i födoväven till toppkonsumenterna. Detta betyder att det mesta material som fixeras av primärproducenter cirkulerar i den mikrobiella födoväven och återförs till vattenmassan eller binds i organiska sediment. Flödesmodellerna visar att mycket material kan ackumuleras i sjöarnas sediment. Detta material kan senare återföras till näringskedjan eller frisläppas när tidigare sjöbottnar omvandlas till våtmarker eller jordbruksmarker. Flödesmodellerna visar också betydelsen av adsorption/desorption till partiklar för radionuklidens transport i akvatiska system. Ämnen som binder starkt till partiklar (till exempel torium) ackumuleras till stor del i sediment, medan ämnen som har låg absorption till partiklar (till exempel jod) till stor del transporteras nedströms med rinnande vatten. Eftersom sorption är en viktig process för transport av vissa ämnen har kompletterande analyser av kemien i suspenderat material utförts /26-31/.

Med hjälp av geografiska informationssystem (GIS) har den rumsliga fördelningen av marina ekosystemkomponenter modellerats i Forsmark och Laxemar-Simpevarp /26-92/. Den dominerande biomassan på båda platserna utgörs av större bottenlevande alger (makrofyter), vilka huvudsakligen finns i de mer kustnära bassängerna. Det är också i dessa bassänger som primärproduktionen är störst. Liksom för sjöar, är det endast en mindre andel av det kol som fixeras av marina primärproducenter som förs vidare i födoväven till toppkonsumenterna. I både Forsmark och Laxemar-Simpevarp dominerar transporten av olika ämnen av de advektiva flödena mellan havsbassänger, medan ackumulationen i sediment är relativt låg. Den beräknade biomassan av marina vegetationen i respektive havsbassäng i Laxemar-Simpevarp har validerats med hjälp av fältobservationer. Jämförelsen visar på en relativt god överensstämmelse /26-32/.



Figur 26-3. De kalkoligotrofa klarvattensjöar som är typiska för dagens Forsmarksområde är relativt små och grunda, och detsamma gäller även för huvuddelen av de sjöar som i framtiden kommer att bildas genom landhöjningen. Den huvudsakliga primärproduktionen i sjöarna sker på bottarna, vilka ofta utgörs av en tjock mikrobiell matta (ovan till höger) eller täta bestånd av kransalger (nedan till höger).

Då vattenströmmar i havet har en avgörande betydelse för flöden och ackumulation av olika ämnen under havsperioden, har för säkerhetsanalysen SR-Site en kompletterande hydrodynamisk modell tagits fram för att beskriva Öregrundsgrepens vattenomsättning under tiden 6500 BC till 9000 AD. Modellen är baserad på den oceanografiska modell som tidigare utvecklats av Engqvist och Andrejevs /26-33/ för Forsmarksområdet, men använder Mike3 med en högupplöst flexibel spatial rumsupplösning. Den kompletterande modellen beskriver hur vattenomsättning och flöden i kustbassängerna i Forsmark förändras över tid som en funktion av vattendjupet då strandlinjen förskjuts i modellområdet. Modelleringen visar att vattenomsättning och flöden mellan bassänger minskar ju grundare modellområdet blir.

Inom ramen för SR-Site har spridning och upptag av element i Öresundsgrepen simulerats med en rumsligt och tidsmässigt högupplöst modell. I modellen kopplas en detaljerad beskrivning av ekologiska processer samman med hydrodynamiska flöden (se ovan), för att mekanistiskt beskriva flöden av kol, kväve och fosfor i tre dimensioner. Arbetet redovisas i samband med rapporteringen av Sr-Site. Modellverktyget som används (Ecolab /DHI 2008/), har tidigare framgångsrikt använts bland annat för att beräkna konsekvenser av övergödning i Finska viken /26-34/. Genom att koppla en radionuklidmodul baserad på /26-35/ till modellen har spridning och upptag av sex utvalda radionuklider beräknats. I simuleringarna varierades bland annat koncentrationsfaktorer för växtplankton under året och i rummet, som en funktion av planktonbiomassa och radionuklidkoncentration i vattnet.

Det har även gjorts en litteratursammanställning om ett tidigare ganska okänt ekosystem i djupt grundvatten /26-36/. Den beskriver stygofauna, det vill säga små djur, till exempel rundmaskar (nematoder) och kräftdjur, som lever i det djupa grundvatten som förekommer i sprickorna i berggrunden. Rapporten tyder på att sannolikheten för förekomst av stygofauna i djupare grundvatten under de förhållanden som råder på de av SKB undersökta platserna är låg, framför allt på grund

av de låga syrehalterna. Arbetet har resulterat i både vetenskapliga artiklar /26-37/ och populärvetenskapliga artiklar /26-38, 26-39, 26-40/.

Program

SKB har tidigare utvecklat mekanistiska ekosystemmodeller med en detaljerad beskrivning av näringsväven för att studera transport och ackumulation av radionuklider i akvatisk miljö /26-35/. I dessa modeller beskrivs flödet av kol som en funktion av primärproduktion, konsumtion, respiration och nedbrytning. Omsättning och ackumulation av andra element i näringsväven beskrivs dynamiskt som en funktion av växtupptag, adsorption, konsumtion och exkretion, med hänsyn till organismernas näringsbehov och elementens egenskaper. SKB kommer att stödja den fortsatta utvecklingen av dessa modeller, med målsättningen att beskriva omsättning och ackumulation av radionuklider i organismer och dött organiskt material i hav och sjöar samt i angränsande våtmarker. Modellbeskrivningar kommer att valideras med befintlig fältdata från Forsmark. Den fortsatta utvecklingen av dessa modeller kommer att ske i form av ett doktorandarbete vid Stockholms universitet, och arbetet kommer främst att omfatta modeller för sjöar.

SKB har tidigare utvecklat en modell som beskriver successionen när havsvikar isoleras och bildar sjöar, och den därpå följande igenväxningen av sjöar till våtmarker /26-41/. Modellen, som bygger på empiriska samband, har därefter vidareutvecklats under arbetet med SR-Site, men den kan göras mera processinriktad genom att i högre grad utnyttja kunskap om utvecklingen av enskilda objekt i Forsmarksområdet. SKB planerar därför en utveckling av successionsmodellen.

26.5 Biogeokemi

Studier av elementkoncentrationer i det ytliga systemet, det vill säga biogeokemin, kan ge grundläggande information om elementens förekomst i olika rumsliga skalor, från den storskaliga fördelningen i landskapet till detaljerade beskrivningar av hur elementen fördelar sig mellan organismer och miljö i ett ekosystem. De stökiometriska relationerna mellan element kan ge god ledning om deras ursprung och de processer som styr de storskaliga fördelningsmönstren i naturen. På en mer detaljerad nivå kan samma information användas för att beskriva hur element tas upp och anrikas i terrestra och akvatiska ekosystem.

Elementfördelningar i ytnära ekosystem kan också användas för att förstå hur radionuklider transporteras och ackumuleras i miljön. För flera radionuklider förekommer stabila isotoper naturligt i miljön (till exempel C, I, Th, Ra, U, Ni). För andra radionuklider kan egenskaper hos ett snarlikt stabilt element (K jämfört med Cs-137), eller egenskaper hos en hel elementgrupp (till exempel sällsynta jordartsmetaller), ge vägledning om kvantitativt viktiga transport- och ackumulationsprocesser.

I de flesta exponeringsmodeller används elementkvoter för att beräkna radionuklidkoncentrationer i miljö och upptag i organismer. *Fördelningskoefficienter* (K_d) beskriver fördelningen av element mellan fast fas och vattenfas (till exempel i avlagringar eller på partiklar i ytvattensystem), och *koncentrationsfaktorer* eller bioackumulationsfaktor speglar ett biologiskt upptag som är proportionellt mot koncentrationen i miljö eller födan. Elementkvoter sammanfattar en mängd olika kemiska, fysikaliska och biologiska processer och antas spegla ett jämviktstillstånd i miljön.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Vid granskningen av Fud-program 2007 framförde SSI att när elementkvoter för en specifik plats ska skattas från övergripande litteratursammanställningar blir osäkerheten ofta stor, eftersom det är svårt eller omöjligt att relatera litteratordata till platsspecifika biologiska, kemiska och fysikaliska förhållanden. SSI påpekade också att det var oklart hur SKB tagit hänsyn till radionuklidens fysikaliska och kemiska egenskaper i utvärderingen av flödesvägar och fördelningen inom olika ekosystem.

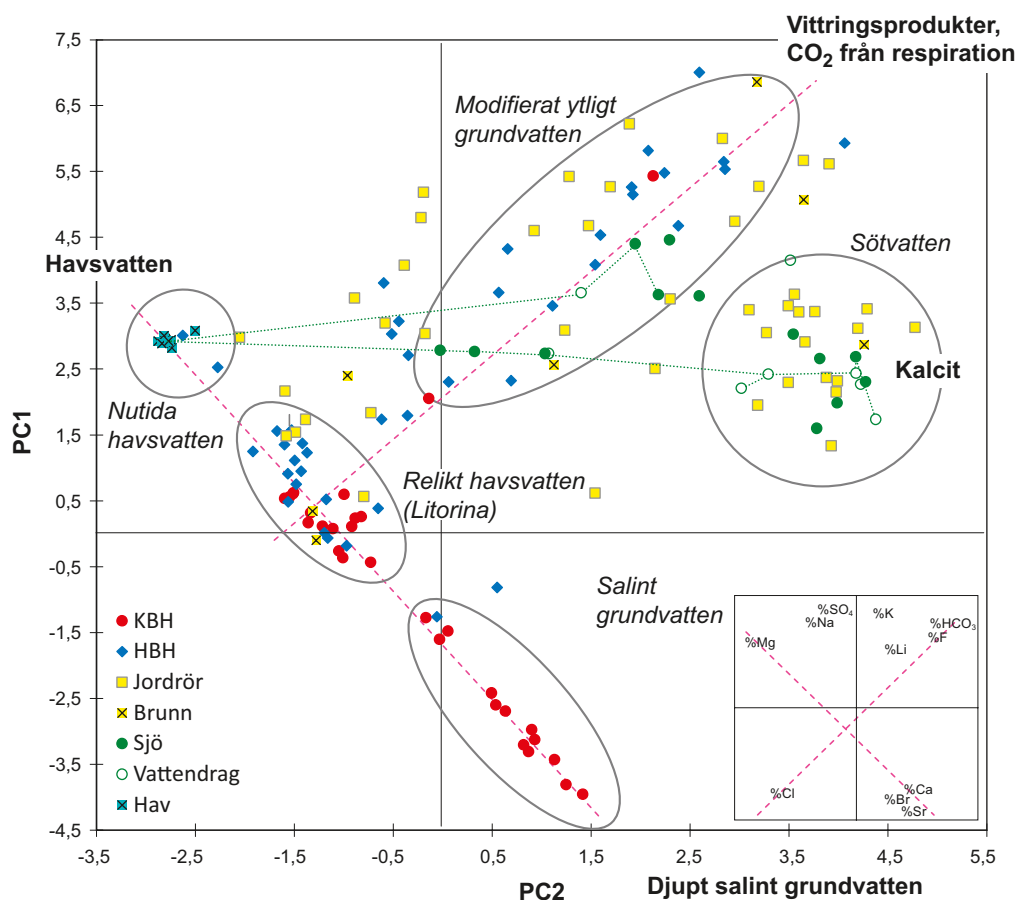
Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Under platsundersökningsprogrammet har SKB karaktäriserat elementkoncentrationer för avlagringar, porvatten och ytvatten, samt för ett stort antal terrestra och akvatiska organismer, se nedan.

Den resulterande databasen är unik, både genom mängden elementinformation som samlats från två välavgränsade geografiska områden och genom den systematiska och synkroniserade provtagning som ligger bakom platsundersökningarna. Nyvunnen biogeokemisk kunskap kommer att sammanfattas och syntetiseras i rapporteringen inom SR-Site. Målet i SKB:s pågående säkerhetsanalys SR-Site är att använda platsspecifika uppskattningar av elementkoncentrationer för att beräkna koncentrationsfaktorer.

Vattenkemin i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har använts för att identifiera de ursprungskällor som påverkar vattnets kemiska sammansättning, samt för att särskilja olika typer av grundvatten /26-42, 26-43/, se figur 26-4. Data har även använts för hydrokemiska massbalansberäkningar, se avsnitt 26.6. Elementkoncentrationer i miljöprover och organismer från flera olika ekosystem i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har karaktäriserats /26-44, 26-45/ och mätningarna har kompletterats med koncentrationer av flera radionuklider (Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Ra-226, Th-229, Th-230, Th-232, U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Tc-99 och I-129) /26-46, 26-47/. Även sediment, porvatten, suspenderat material och filtrerat vatten har analyserats, och K_d -värden har skattats för akvatiska miljöer /26-31/.

Den kemiska sammansättningen av abiotiskt och biotiskt material från en havsvik i Forsmarksområdet har studerats i detalj /26-48/. Fördelningen av 48 element i större organismgrupper (växtplankton, djurplankton, bottenlevande mikroalger, makroalger, akvatiska kärlväxter och i flera olika typer av bottenlevande organismer och fisk), samt i löst och partikulärt material i vattnet och i sedimentet undersöktes. Det finns en avsevärd variation i grundämneskoncentration mellan olika organismer, och mellan organismer och miljön. Skillnader i upptag och bioackumulation förklarades med elementens biologiska funktion, samt organismernas olikheter med avseende på livsmiljö,



Figur 26-4. Kemisk sammansättning av vattenprover från Forsmark. Fem vattentyper (elipser) och fyra jonkällor (fet text) har identifierats med hjälp av samvariationen i vattenkoncentration för huvudkonstituenterna. Axlarna i figuren (PC1 och PC2) är principalkomponenter (Principal Components) som tillsammans sammanfattar 80 procent av den totala variationen av vattenkoncentrationer. KBH = Kärnbrorrhål, HBH = Hammarborrhål. Bilden modifierad från /26-42/.

ekosystemfunktion, trofisk nivå och morfologi. Intressant att notera är att när elementkoncentrationer anges per enhet kol, visar resultaten att få element ackumuleras i näringskedjan.

Fördelningen av ett stort antal element i olika skogsekosystem studerades i ett samarbetsprojekt med högskolan i Kalmar /26-27/. Genom att studera samvariation i fältprover identifierades två huvudgrupper av element: 1) element som främst återfanns i mineraljorden (till exempel metaller och aktinider) och endast når låga koncentrationer i organiskt material och levande vävnad; 2) element med relativt höga koncentrationer i växter och humus, vilka främst utgörs av växtnäringsämnen. Fördelningen inom växter av de stabila formerna av fosfor, jod, torium och uran har studerats för samma ekosystem /26-9, 26-28 26-29/. Som förväntat återfanns de tyngre ämnena (torium och uran) främst i finrötter, medan växtnäringsämnena jod och fosfor även återfanns i ovanjordiska delar. Inga tydliga skillnader i växternas allokering av de olika ämnena kunde urskiljas mellan fuktigare och torrare markslag.

Kemin i jord och porvatten har analyserats i prover från ett antal terrestra ekosystem som är representativa för dagens förhållanden i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Platsspecifika K_d -värden har beräknats och jämförts med ett omfattande datamaterial från Kanada /26-49/. Skattningarna låg inom samma intervall, med undantag av K_d -värdena för Cl, I och Se. K_d relaterades även till kemiska och fysikaliska egenskaper i jordarna med hjälp av regressionsanalys. Resultaten visade att pH, lerinnehåll och halt organiskt material var de faktorer som bäst förklarade variationen i K_d mellan undersökta prover. Platsspecifika K_d -värden för sediment och suspenderat material i sjöar och hav har också beräknats /26-49/ baserat på platsdata /26-31, 26-48/. För dessa prover visade sig typen av fast fas (det vill säga om provet innehöll sediment eller suspenderat material) och typen av ekosystem (marint eller limniskt) påverkar K_d -värdena för många element, medan det sedimentdjup som provet var taget på bara hade betydelse för enstaka element.

Inom SR-Site har platsdata använts i största möjliga utsträckning för att beräkna koncentrationsfaktorer. SKB har också uppdaterat tidigare litteratursammanställningar /26-50/ med aktuella data, bland annat från IAEA:s databas /26-51/. Plats- och litteraturdata har kombinerats med hjälp av det statistiska verktyget Babar, som utvecklats med stöd från SKB, Posiva, NRPA (Norwegian Radiation Protection Authority) och EDF (Electricité de France). Detta betyder att all tillgänglig information används för att skatta koncentrationsfaktorer, men att data från platsen vägt tyngre än data från andra platser.

Utöver provtagningarna vid platserna har laboriemätningar av sorptionsegenskaper hos jordprover från Laxemar-området genomförts. Sorptionen studerades för sju ämnen (I, Cs, Sr, Ni, Eu, U och Np) i morän, sand, lera, lergyttja, gyttja och torv /26-52/. En utvärdering av resultaten pågår för närvarande (våren 2010). Ett viktigt moment i utvärderingen är att relatera uppmätta K_d -värden till kemiska och fysikaliska egenskaper hos de aktuella jordarna /26-53, 26-54/.

Parallellt med utvecklingen av hur platsspecifik information används för att skatta koncentrationsfaktorer och K_d -värden bedriver vi långsiktig forskning för att öka processförståelsen av retention och biologiskt upptag. Ett exempel är det pågående doktorandprojektet i anslutning till Krycklan catchment study, ett annat är den processbaserade modellering av radionuklidretention som utvecklats i en serie arbeten /26-55, 26-56, 26-57, 26-58/, se avsnitt 26.6. SKB har även använt mekanistiska beskrivningar i modelleringsstudier av de biologiska processer som styr upptag och ackumulation, bland annat för att studera rumslig och säsongsbunden variation av elementkoncentrationer i en marin näringskedja, se avsnitt 26.4. Forskning inom ytsystemkemi som utförs i samarbete med Linnéuniversitet, med koppling till Nova FoU, beskrivs i avsnitt 17.3.2.

Program

Insamlingen och sammanställningen av information som använts för att beskriva elementkoncentrationer på undersökningsplatserna är unik. Det fortsatta arbetet inom programmet kommer huvudsakligen att bestå av att bearbeta insamlade data för att öka förståelsen för och beskrivningen av retention och biologiskt upptag på olika rumsliga skalor.

SKB avser att vidareutveckla modellerna av växters radionuklidupptag, både i akvatiska och terrestra ekosystem. För detta kommer vi att skilja på aktivt upptag av närsalter (och analoga radionuklider) och passivt upptag av spårämnen (transpiration, diffusion, adsorption), samt beakta biotillgängligheten av ämnen som tas upp (se till exempel /26-59/).

För att öka förståelsen för orsakerna till variationen i uppmätta koncentrationsfaktorer ska kompletterande kemiska analyser av prover från Forsmarksområdet göras. Den processbaserade modelleringen av radionuklidretention i jordlagren kommer även att fortsätta, se avsnitt 26.6.

26.6 Hydrologi och transport

Detta avsnitt behandlar hydrologi och ämnestransport i ytnära ekosystem, vilket innebär att framställningen i huvudsak begränsas till att omfatta vattenflöden och transportprocesser i jordlagren, på markytan och i olika typer av ytvatten. Även om många av de beräkningsmodeller som diskuteras inkluderar delar av det underliggande berget, är de problemställningar som tas upp i första hand förknippade med processer i jordlagren och tillhörande vattensystem. De forsknings- och utvecklingsbehov som behandlas i det följande är således kopplade till förståelsen av den del av systemet som ligger ovanför bergöverytan och modelleringsinsatser som inbegriper denna volym. Motsvarande beskrivningar av hydrologi och transport i berget finns i kapitel 25.

Transportmodellering är en central komponent i såväl dosmodellering som ekosystemmodellering. Dessa modelleringar beskrivs dock separat i andra delar av detta kapitel. När det gäller transport koncentrerar vi oss i detta avsnitt på modelleringar som utförs för att beskriva de undersökta områdena och för att stödja säkerhetsanalysen med processförståelse och parametervärden. Beträffande den hydrologiska modelleringen tar vi upp aktiviteter kopplade till såväl platsbeskrivning och säkerhetsanalys som miljökonsekvensbeskrivning (MKB).

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

Vid granskningen av Fud-program 2007 framfördes synpunkter på bland annat användningen av platsdata i säkerhetsanalysen, beskrivningen av övergången mellan jord och berg, samt frånvaron eller representationen av vissa processer i våra modeller. Specifika problem som påtalades handlade om brister i beskrivningen av spridning och retention i jordlager och sediment, frånvaron av studier av det kontaminerade områdets storlek och att beskrivningen av kopplingen mellan jordlager/ytligt berg och det djupa berget måste förbättras.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Utvecklingen inom modellering av hydrologi och olika former av ämnestransport i ytnära ekosystem har under de senaste åren främst skett inom ramen för platsbeskrivande modellering och säkerhetsanalys. Den platsbeskrivande modelleringen har avslutats i och med publiceringen av modellversion SDM-Site /26-3, 26-4/ och resultaten används i de pågående säkerhetsanalys- och MKB-arbetena. Under perioden har ett antal artiklar som beskriver modelleringsmetodik och resultat publicerats i vetenskapliga tidskrifter och i samband med konferenser /26-60, 26-61, 26-62/.

Stora insatser har gjorts för att utveckla ydrologiska modeller för beskrivning av ytvatten och ytnära grundvatten inom SKB:s undersökningsområden i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Dessa modeller har sedan använts för modellering av advektiv (vattenburen) transport i form av partikel-spårning och i så kallad advektiv-dispersiv transportmodellering (nedan benämnd ADE-modellering) där även spridning till följd av hastighetsvariationer och diffusion beaktas. Rapporteringen av hydrologi och transportmodellering i SDM-Site Forsmark utgörs av en utvärderande och sammanfattande huvudrapport /26-63/ med tillhörande underlagsrapporter som beskriver data och datautvärdering /26-64/, numerisk flödesmodellering /26-65/ samt transportmodellering /26-66/. Rapporteringen av SDM-Site Laxemar har en liknande struktur och omfattar en huvudrapport /26-67/, en data- och datautvärderingsrapport /26-68/ samt en rapport som beskriver den numeriska modelleringen av flöde och transport /26-69/.

I den hydrologiska modelleringen används beräkningsverktyget Mike She (se /26-65/), med vilket man kan modellera mättad och omättad strömning i jordlager och berg, ytvattenflöden på markytan och i ytvattensystemet, avdunstning och växters vattenupptag och transpiration, samt vattenutbyten mellan dessa hydrologiska undersystem. Viktiga resultat från platsmodelleringen inbegriper vattenbalansens komponenter, in- och utströmningsområdets fördelning och förändringar i tid och rum, vattenutbyten mellan grundvatten och olika former av ytvatten, samt platsspecifika

värden på hydrogeologiska parametrar (främst de olika jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter). Beräkningsresultaten stöds av ett betydande dataunderlag från hydraultester i grundvattentrör, flödesmätningar i vattendrag och nivåmätningar i grund- och ytvatten, vilket har använts för jämförelser mellan mätningar och beräkningsresultat i modellkalibreringar och känslighetsanalyser.

Flödesvägarna för utströmmande grundvatten från tänkbara förvarsvolymer i berget är viktiga för säkerhetsanalysens biosfärmodellering. Eftersom utströmning ofta sker i sjöar och våtmarker, är förståelsen av kopplingen mellan ytvatten och grundvatten i markens mättade och omättade zoner i sådana områden av särskild betydelse. Förhållandena kring sjöar och våtmarker har därför special-studerats i såväl datautvärderingar som numeriska modelleringar (figur 26-5), se sammanfattande beskrivningar av Forsmark och Laxemar-Simpevarp i /26-63/ respektive /26-67/.

Särskilt Forsmarksområdet innehåller många sjöar och våtmarker som är betydelsefulla både för analysen av ekologiska konsekvenser under uppförande- och driftskedena och i säkerhetsanalysen av långsiktiga strålningsrisker. Genomförda modelleringar har bland annat visat att sjöarnas strandzoner har en viktig roll i vattenutbytet mellan grund- och ytvatten och att förhållandena under sjöarna periodvis påverkas av avdunstningsprocesser i omgivande landområden. Sjöarna kan tidvis övergå från att utgöra utströmningsområden till att vara inströmningsområden för grundvatten. Detaljerade studier av specifika hydrologiska objekt görs i den pågående säkerhetsanalysen för att utveckla och beräkna parametervärden till modellerna för landskapsobjekten i Forsmark, se vidare avsnitt 26.9.

Den samordnade utvärderingen av uppmätta vattennivåer i ytvatten och grundvattennivåer i jord och berg har legat till grund för en integrerad yhydrologisk och hydrogeologisk modell, se /26-63/. Den har tillsammans med övriga resultat från platsmodelleringen utgjort grund för fortsatta yhydrologiska modelleringar inom SR-Site, till exempel detaljerade studier av flödesvägar och vattenbalanser i nuvarande och framtida landområden, och modelleringar av hydrologin under tänkbara framtida klimatförhållanden inklusive permafrost.

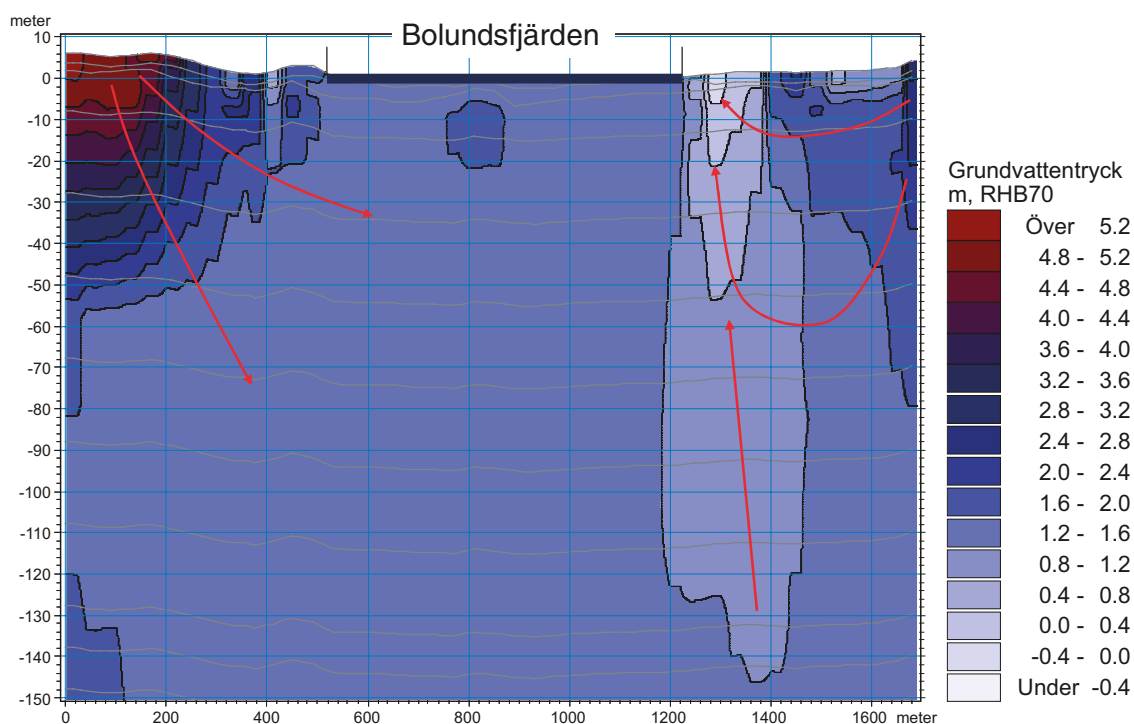
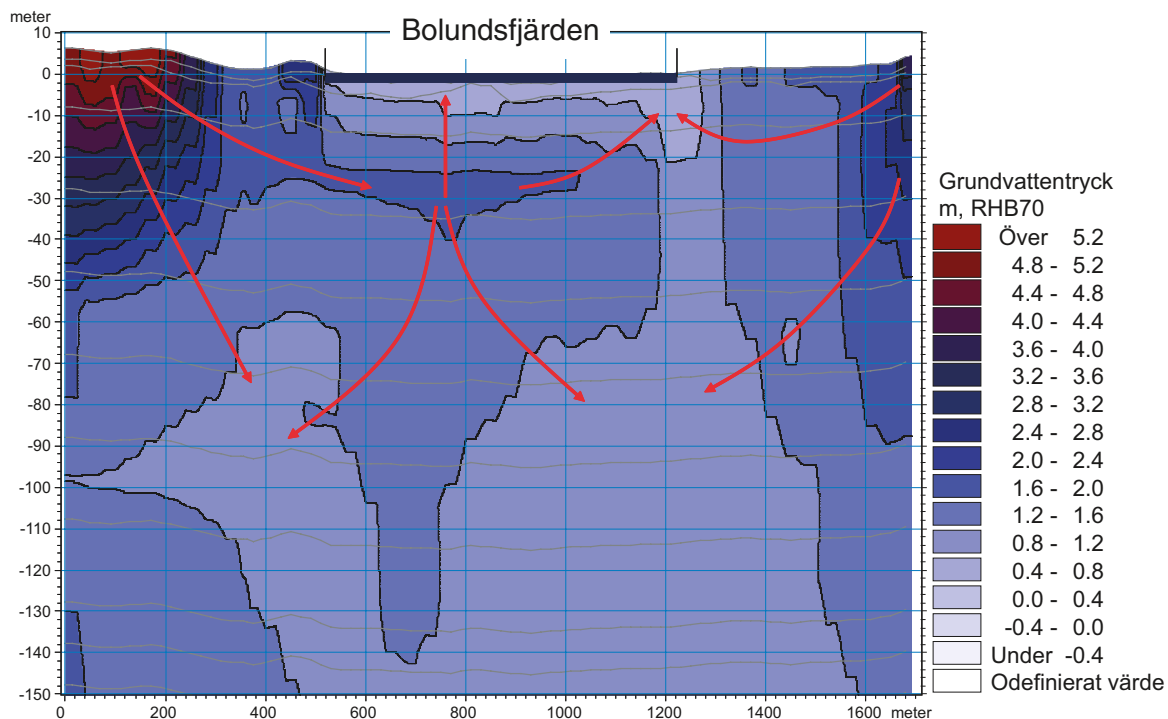
För att stödja MKB-arbetet har SKB undersökt effekterna på grundvattensänkning och ytvattennivåer av ett öppet förvar /26-70, 26-71/. Yhydrologisk modellering har använts för att avgränsa påverkansområden och för att kvantifiera ekologiska och andra konsekvenser av grundvattensänkningen. Den viktigaste utvecklingen inom detta område ligger i tillämpningen av modelleringsresultaten i konsekvensanalysen. De slutliga resultaten kommer att presenteras i MKB:n med tillhörande underlagsrapporter.

Förutom ovan beskrivna partikelspårning och ADE-modellering, har SKB även genomfört transportmodellering med fokus på andra processer. Dessa modelleringar har tillfört nya kunskaper om omsättningen av en mängd ämnen i grund- och ytvatten och om förutsättningarna för fördröjning av radionuklider i jordlagren.

Elementtransport inom avrinningsområden har studerats med hydrokemiska massbalansmodeller /26-42, 26-43/. Massbalanser beräknades för makroelement från vattenkoncentrationer och flöden på platserna. Beräkningarna gav en god uppfattning om elements ursprung, huvudsakliga transportvägar och ackumulation i landskapet. Vi har även studerat hydrodynamik och marin transport av kol, näringsämnen och radionuklider i löst och partikulär fas, med utgångspunkt från platsdata från Forsmark, se avsnitt 26.4.

Processbaserad modellering av radionuklidretention i jordlagren har undersökts i en serie arbeten som redovisats i såväl SKB-rapporter /26-55, 26-56/ som i vetenskapliga artiklar /26-57, 26-58/. Potentiella retentionsprocesser och deras effekter på transport av utvalda radionuklider har identifierats via en grundlig litteraturgenomgång. Vidare har retentionen av cesium, strontium, uran och radium beräknats. Retentionsmodelleringar av fler ämnen görs inom ramen för den pågående säkerhetsanalysen.

Radionuklidtransport i ytnära system studeras också i pågående SKB-finansierade forskningsprojekt i anslutning till Krycklan catchment study. Denna forskning inleddes med analys av data från en våtmark i Laxemar-Simpevarp /26-72/ och baseras på ett omfattande underlag av hydrologiska och kemiska data (radionuklider och en mängd andra ämnen) som insamlats inom Krycklanområdet i Västerbotten. Studien syftar i första hand till att beskriva transport och fastläggning av radionuklider kring vattendrag och i våtmarker.



Figur 26-5. Simulerade grundvattentryck i en väst-östlig profil över Bolundsfjärden under en våt period (april 2006, övre bild) och en torr period (augusti 2006, nedre bild) /26-65/.

Som exempel på forskningsarbeten baserade på SKB:s platsdata kan nämnas att uppmätta tidsserier från Forsmark användes för att undersöka kalibreringsmetodik och värdet av ytterligare data för att reducera osäkerheter /26-73/. Data från Forsmark och Laxemar-Simpevarp har också utgjort en del av underlaget för en serie studier av hydrologi och transportprocesser där forskare vid Stockholms universitet har undersökt avrinningens fördelning på olika utlopp från kustnära avrinningsområden, betydelsen av flödes- och nedbrytningsprocesser för belastningen på utanförliggande recipient, bidraget från avrinningsområden som normalt inte övervakas till Östersjön i stort, samt metodutveckling avseende riskbedömningar /26-74, 26-75, 26-76, 26-77/.

Program

Forskning och utveckling under den kommande programperioden kommer till stor del att bygga vidare på pågående aktiviteter. Dessutom planeras kompletterande studier av frågeställningar som identifierats inom säkerhetsanalysen. Planerna för den kommande perioden innefattar såväl studier inriktade mot processförståelse som en fortsatt utveckling av beräkningsverktyg.

Den SKB-finansierade forskningen inom Krycklan catchment study har nyligen utökats. Viktiga frågeställningar som undersöks är kopplingen mellan organiskt material och radionuklider i samband med transport till och inom potentiella utströmningsområden för grundvatten (främst bäckar och myrar). Arbetet inom det pågående doktorandprojektet kommer att fokuseras på att slutföra och publicera resultaten av ett antal delstudier. En viktig del av det fortsatta arbetet är att koppla nyvunnen kunskap från Krycklanstudien till SKB:s undersökningsområden, det vill säga att utvärdera vilka resultat och slutsatser som kan vara giltiga även i Forsmark och Laxemar-Simpevarp.

Modellering är en väsentlig del i en sådan generalisering och modelleringsresurser har tillförts Krycklanstudien via ett nyligen påbörjat postdoktorandprojekt. Modeller med olika grader av komplexitet (K_d -baserade respektive mekanistiska modeller) som utvecklas i Krycklanstudien kommer att testas med oberoende data från Forsmark och Laxemar-Simpevarp.

Den processbaserade modelleringen av advektiv-reaktiv radionuklidtransport kommer att fortsätta och utvecklas för att inkludera fler delar av ytsystemet. Hittills har modelleringen utförts enbart för den vattenmättade delen av jordlagren. I det fortsatta arbetet ska även markens omättade zon och nyckelprocesser såsom upptag i växter inkluderas. Avsikten är att detta arbete ska bedrivas inom ett internationellt samarbetsprojekt.

Arbetet med massbalanser, som ett sätt att beskriva och förutsäga ämnens fördelning i landskapet, kommer att fortsätta. Antalet element utökas och luftdeposition och sedimentkoncentrationer kommer att inkluderas i beräkningarna, som kommer att skalas upp till landskapsnivå. För att förbättra dataunderlaget kommer en komplettering av depositionsdata (nederbördskemi) från Forsmarksområdet att göras under år 2010.

SKB kommer att fortsätta sitt arbete med att karaktärisera utströmningsområdets storlek, lägen och de processer som styr transporten där. Vi avser att studera specifika hydrologiska objekt som representerar alla successionsstadier i landskapsutvecklingen, från marina bassänger över igenväxande sjöar till våtmarker och vattendrag.

Vi planerar en vidareutveckling av de beräkningsverktyg som används för modellering av hydrologi (vattenflöden) och advektiv transport av lösta ämnen (i form av partikelspårning och ADE-modellering). I vidareutvecklingen ingår förbättring av möjligheter att beskriva växlingarna mellan frusna och ofrusna förhållanden i markens översta del i permafrostmiljöer. I planerna ingår också att stödja utvecklingen av verktyg med förmåga att hantera transport i olika jordlager (mättad och omättad zon) och ytvatten, för att förbättra förutsättningarna för det fortsatta arbetet med att karaktärisera utströmningsområden och transport där. SKB använder sig i dag av ett kommersiellt verktyg (Mike She) för att modellera hydrologi och advektiv transport och kommer att stödja utvecklingen av verktyget i samarbete med programleverantören.

Under den kommande programperioden ska även stödet till universitetsforskare som använder data från SKB:s undersökningsområden fortsätta. Det finns sedan flera år ett samarbete med Stockholms universitet och nya modelleringsaktiviteter har nyligen initierats vid KTH.

26.7 Effekter av långtidsvariationer

Vår förståelse för hur element transporteras och ackumuleras i ytnära ekosystem bygger framför allt på beskrivningar av företeelser och processer som i dag kan observeras i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Många processer är klimatberoende och har varierat i intensitet i takt med att klimatet växlat. Andra processer är sekundärt relaterade till klimatet och förändringar i klimatet. Landhöjningen som starkt påverkar landskapsutvecklingen i kustnära områden som Forsmark, är till exempel en återgång till ett nytt jämviktsläge efter inlandsisars nedpressning av berggrunden. Salthalten i Östersjön är ett annat exempel på hur strandlinjeförskjutning interagerar med avrinning, som båda påverkas av klimatet. För att bedöma den långsiktiga säkerheten av ett förvar är det därför nödvändigt att beakta långtidsvariationer som orsakas av klimatförändringar.

Klimatstyrda processdomäner /26-78/ (eller förenklat klimatdomäner) är ett begrepp som utvecklats av SKB för att klassificera miljöförutsättningar som har betydelse för funktion och säkerhet av ett förvar. Tre klimatdomäner har identifierats som relevanta för säkerhetsanalysen SR-Site, nämligen *periglaciala* förhållanden med kyligt klimat och djup permafrost, *glaciala* förhållanden då platsen täcks av en inlandsis, samt *tempererade* förhållanden som omfattar dagens klimat och även ett betydligt varmare klimat. Vi har exemplifierat förhållanden under respektive klimatdomän för att bedöma hur viktiga processer och företeelser påverkas av långtidsvariationer i klimatet. De tre klimatdomänerna används också i arbetet med att konstruera tänkbara framtida klimatutvecklingar, bland annat en så kallad referensutveckling som baseras på en upprepning av de förhållanden som rått under den senaste glaciala cykeln.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 beskrevs planer på en sammanställning av ytsystemens funktion under tillstånd av permafrost. Kärnavfallsrådet påpekade i sin granskning att de saknade ett program för att närmare beskriva biosfärens utveckling under klimat som är varmare än i dag.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Inom ramen för SR-Site har klimatförhållanden (till exempel temperatur, nederbörd, ytvattenbalans och vegetationsperiodens längd) under de olika klimatdomänerna beskrivits /26-19/ (se kapitel 19). Med utgångspunkt från denna beskrivning och aktuell vetenskaplig litteratur har vi bedömt hur ekosystemen påverkas av variationer i klimat, samt vilka effekter detta kan få för faktorer som påverkar den långsiktiga radiologiska säkerheten för människor och andra organismer. Inom den pågående säkerhetsanalysen SR-Site har ythydrologi och transport modellerats för tänkbara framtida klimat som skiljer sig från dagens; både kallare (permafrost) och våtare klimat har studerats. Även effekten av ett kallare klimat på igenväxning av sjöar och bildningen av talikar (vid permafrost, områden av ofrusen mark under till exempel sjöar) har modellerats. Resultaten har bland annat använts som underlag för att beskriva ytnära ekosystem under tänkbara framtida klimatförändringar i den pågående säkerhetsanalysen och kommer att redovisas i den.

I samband med säkerhetsanalysen SR-Site har också en ny modell för strandlinjeförskjutning under hela referensutvecklingen tagits fram /26-79/. Den nya modellen utgörs av en kombination av den tidigare modellen, som beskrev strandlinjeförskjutningen från den senaste isavsmältningen fram till i dag /26-80/, och en ny modell för den framtida strandlinjeförskjutningen /26-81/.

SKB har inlett fältstudier av ytnära ekosystem under periglaciala förhållanden på Grönland i det SKB-stödda samarbetsprojektet Greenland Analogue Project (GAP), se avsnitt 19.6. GAP är framför allt fokuserat på glacialhydrologi och geokemiska förhållanden i och i närheten av en inlandsis. Sommaren 2008 genomförde SKB inledande fältarbete, i syfte att rekognosera möjligheterna för ett utökat undersökningsprogram som även omfattar ekologi, ythydrologi och markprocesser, se figur 26-6.

Program

Under den kommande programperioden kommer vi att beskriva periglaciala miljöer som existerar i dag. Fältundersökningar på Grönland och modelleringar av områden med potentiell grundvattenutströmning kommer att användas för att öka förståelsen för hur processer och företeelser som styr transport och ackumulation av radionuklider påverkas av ett kallare klimat. Resultat från GAP-projektet kommer även att användas för att beskriva hur kopplingen mellan ytnära ekosystem och berget påverkas av periglaciala förhållanden.

En utveckling mot ett klimat som är väsentligt varmare än i dag kan komma att innebära förändringar både för miljö och för människor. Flera av de processer som är viktiga för transport och ackumulation av radionuklider i ytnära ekosystem kan påverkas av till exempel vattenomsättning och isläggningsstid. SKB kommer därför att även fortsättningsvis följa kunskapsutvecklingen inom området, samt att med modellstudier undersöka hur förändringar i till exempel temperatur, hydrologi och markanvändning som förknippas med ett varmare klimat kan påverka långsiktig radiologisk säkerhet för människor och andra organismer.



Figur 26-6. Som ett led i att karaktärisera ytvattnets ursprung mäts bland annat vattnets konduktivitet. Arbetet ägde rum under en fältvecka med pilotstudier i periglacial miljö i närheten av Kangerlussuaq, Grönland sommaren 2008.

26.8 Landskapsutveckling och avlagringar

Som ett underlag för säkerhetsanalyser, har SKB arbetat med en historisk beskrivning av de företeelser och processer som styr landskapets utveckling i Forsmark och Laxemar-Simpevarp /26-82/. Den historiska beskrivningen har kopplats ihop med aktuell förståelse av hur landskapet ser ut och fungerar i dag /26-83, 26-84/. Tillsammans utgör dessa grunden för att beskriva en sannolik utveckling av landskapet under olika antaganden om framtida klimat och strandlinjeutveckling.

Vi har under platsundersökningarna, de efterföljande platsmodelleringarna och i samband med säkerhetsanalysen SR-Site, beskrivit landskapets geometrier, från berggrundens överyta via djupare avlagringar av morän och lera till jordmåner och ytliga sediment. Avlagringarnas fysikaliska och kemiska egenskaper har karaktäriserats och den resulterande platsmodellen är utgångspunkten för att beskriva ett landskap i förändring.

Klimatvariation och strandlinjeförskjutning är dominerande företeelser som styr landskapsutvecklingen i Forsmark och Laxemar-Simpevarp, se avsnitt 26.7 ovan. Naturliga klimatförändringar leder till en långsamt upprepad glaciationscykel, med en succession från istida havsförhållanden till ett tempererat klimat där landskapet slutligen domineras av terrestra ekosystem /26-82/. Ovanpå dessa storskaliga och långsamma förändringar, påverkas landskapet av sediment som tillförs och omlagras. Sjöar grundas upp och växer igen. De kemiska egenskaperna av mark och vatten förändras liksom artsammansättningen av växter och djur när ekosystemen avlöser varandra.

I landskapets topografiska lågpunkter återfinns hydrologiska utströmningsområden. Till exempel i anslutning till sjöar, vattendrag och våtmarker, se avsnitt 26.6. Förutsättningarna för transport och ackumulation av radionuklider i dessa områden bestäms av geometrier och egenskaper i det lokala och regionala avrinningsområdet. Landskapets storskaliga utveckling definierar var och när djupt grundvatten kan strömma upp till ytan. Utströmningsområdenas naturliga succession och deras möjlighet att brukas av framtida mänskliga samhällen för produktion av föda och som livsrum, är en förutsättning för att beräkna radiologisk risk för människan och miljön, se avsnitt 26.9.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 var målsättningen att vidareutveckla metodiken för dosberäkningarna, vilken även beaktar radiologisk påverkan på miljön så att den speglar aktuell kunskap från platserna, till exempel med avseende på landskapsutveckling och människans bruk av naturresurser. I sin granskning av biosfärprogrammet ansåg SSI att SKB:s utveckling av en integrerad landskapsmodell som beskriver flera ekosystem i succession är ett framsteg i utvecklingen av säkerhetsanalysen, men att kopplingen mellan landskapsmodellen och processbaserade beräkningar av transport och ackumulation var otydlig. SSM har i sin granskning av säkerhetsredovisning för SFR-1 /26-85/ betonat vikten av en landskapsbeskrivning som tar hänsyn till den naturliga övergången mellan ekosystem /26-86/. En översyn av frågor kopplade till storleksval av biosfärobject ansågs också angelägen.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2007

Under programperioden har SKB tagit fram konceptuella och numeriska modeller som beskriver den historiska landskapsutvecklingen fram till i dag i undersökningsområdena. Beskrivningen omfattar bland annat geometriska modeller av topografi /26-79, 26-87/ och jorddjup /26-88, 26-89/, karakteriseringar av dagens jordarter och deras fysikaliska och kemiska egenskaper /26-90, 26-91/, en konceptuell modell av ekosystemens succession i regionerna, samt en historisk beskrivning av befolkning och markanvändning på platserna fram till i dag. Arbetet har sammanfattats i platsbeskrivningar av ytnära ekosystem för Forsmark och Laxemar-Simpevarp /26-3, 26-4/.

Som en del i säkerhetsanalysen SR-Site har förståelsen från den historiska landskapsutvecklingen använts för att ta fram tänkbara framtidsbeskrivningar av landskapen i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Dessa beskrivningar bygger på en ny modell för strandlinjeutvecklingen /26-79/ och omfattar hela den pågående interglacialen (med perioder av permafrost), och varianter av klimat som uppstår vid global uppvärmning. Detta arbete kommer att slutrapporteras inom ramen för SR-Site. Processförståelse från platsen har bland annat omsatts i numeriska modeller som beskriver hydrodynamiken i havet, se avsnitt 26.4, och den framtida uppbyggnaden och erosionen av sediment i havet och på land /26-92/ för en hel interglacial, se figur 26-7. Till detta har hydrologin för framtida landskap och klimat kopplats, se avsnitt 26.6. Resultatet är en rumslig beskrivning av hur landskapet utvecklas kontinuerligt från hav till land, där havsvikar grundas upp och snörs av till sjöar, och sjöar växer igen till våtmarker. På detta landskap har sedan olika varianter av markanvändning tillämpats, från ett orört landskap som brukas för jakt och fiske, till ett rent jordbrukslandskap där all lämplig mark dikas och brukas för odling.

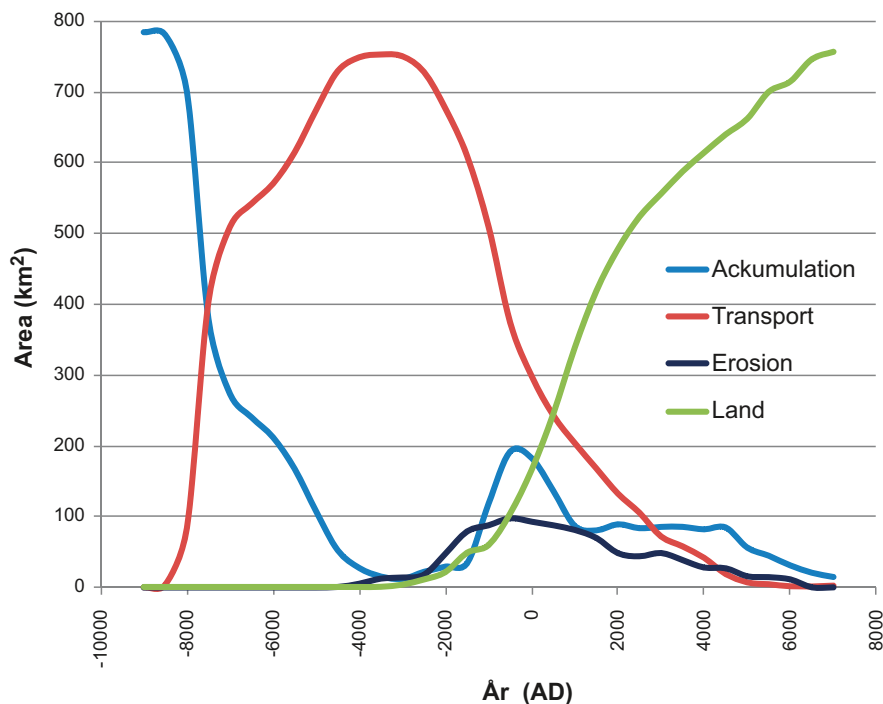
Framtida områden där utströmning av djupt grundvatten från ett förvar är tänkbar är den geografiska enhet som används för att göra bedömningar av radiologisk risk, så kallade biosfärobject. Objektets egenskaper (inklusive avrinningsområdets storlek) och utveckling styr direkt den modellering av transport och ackumulation av radionuklider som ligger till grund för säkerhetsanalysen, se avsnitt 26.9.

Program

Under den kommande programperioden kommer SKB att fördjupa sin förståelse för transport och ackumulation av radionuklider på landskapsnivå, samt vidareutveckla metodiken för att beskriva landskapet och dess utveckling. Forskning och utveckling kommer främst att ske i samarbete med de universitet och organisationer som tidigare varit delaktiga i arbetet. Tyngdpunkten i utvecklingsarbetet kommer att ligga på två delar, dels på den konceptuella förståelsen, dels på att förbättra beskrivningen av processer och parametrar som har avgörande betydelse för säkerhetsanalyser.

Utvecklingen av den konceptuella förståelsen av hur radionuklider transporteras och ackumuleras i ett landskap under förändring kommer att utgå från resultat från simuleringsstudier och empiriska resultat från planerade studier av massbalanser på landskapsnivå, se avsnitt 26.6. Kunskapen kommer att syntetiseras i en konceptuell modell av landskapet som kommer att omfatta flera tänkbara typer av markanvändning och klimat.

Känslighets- och osäkerhetsanalysen inom säkerhetsanalysen SR-Site kommer att identifiera företeelser och processer som har betydelse för beskrivningen av landskapsutvecklingen och den långsiktiga säkerheten. Preliminära analyser visar att igenväxningshastigheten, som är en viktig faktor för landskapsutvecklingen, är behäftad med osäkerheter. Kunskapen från det planerade



Figur 26-7. Förändring i utsträckningen av havsbottentyper och land i Forsmarksområdet. Utvecklingen bygger på dagens beskrivning av topografi, vattendjup och jorddjup, samt modeller för sedimentation och strandlinjeförskjutning. Bilden är hämtad från /26-92/.

biosfärprogrammet kommer därför att utgöra ett viktigt underlag för att förfinna modeller som beskriver ekosystemsuccesjonen från havsvik till våtmark på landskapsnivå samt hur denna påverkas av klimatförändringar, se avsnitten 26.3, 26.4, respektive 26.7.

Den beräknade strålningsdosen till framtida invånare baseras på antaganden och förenklingar om hur människor kan vistas i och bruka naturresurser i landskapet. Vi kommer fortsatt att arbeta med att förankra beskrivningen av framtida människors vanor i kunskap om historiska och samtida självförsörjande kulturer och människans näringsbehov. Realistiska antaganden om framtida människor kommer att utgå från ett landskapsperspektiv.

26.9 Radionuklidmodellering

Forskningsprogrammet för ytnära ekosystem syftar till att ge förutsättningar för en trovärdig bedömning av radiologiska risker för människor och andra organismer i samband med slutförvaring av använt kärnbränsle. En central del av programmet är därför att använda vår förståelse av processer och företeelser för att förenkla verkligheten, så att transport och ackumulation av radionuklider i miljön kan beskrivas med numeriska modeller. Koncentrationen av radionuklider i födoämnen och dricksvatten uppskattas i sin tur från radionuklidernas fördelning i miljön. För att beräkna exponeringen för en representativ individ kombineras koncentrationer av radionuklider i miljön och födan med kunskap om strålningseffekter på kroppen (så kallade doskonverteringsfaktorer) och antaganden om de framtida invånarnas vanor.

Under åren har representationen av biosfären i SKB:s säkerhetsanalyser utvecklats från generella och förenklade beskrivningar av enskilda ekosystem, till modeller som beskriver flera kopplade recipienter som utvecklas dynamiskt i landskapet, som en funktion av landhöjningen och strandförskjutningen, se avsnitt 26.8. I dagens dosmodell styrs radionuklidens transport av detaljerad kunskap om hydrologiska flöden och ackumulation sker genom adsorption till suspenderat partikulärt material, sediment och markpartiklar. Modellen beskriver också hur radionuklider binds in i organiskt material via växtupptag och hur de därefter omsätts via konsumtion eller via nedbrytning. En ackumulation av radionuklider med lång halveringstid i organiskt material är alltså möjlig i miljöer där omsättningstiden är lång, till exempel i markens humuslager eller i våtmarker.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

I Fud-program 2007 var målsättningen att vidareutveckla metodiken för exponeringsberäkningarna så att dessa kan användas för att bedöma risk för både människors hälsa och miljön. Målet var en metodik som kan tillämpas på alla viktiga radionuklider samt speglar aktuell kunskap från platserna, till exempel med avseende på landskapsutveckling, nyckelfaktorer för transport och ackumulation samt människans bruk av naturresurser. Det fanns en ambition att harmonisera representationen av processer i de olika ekosystemen och att ersätta empiriska överföringsfaktorer mellan miljö och mänsklig föda med en mekanistisk beskrivning av växtupptag och bioackumulation. Vidare planerades en omfattande känslighetsanalys av modelleringsresultaten.

I sin granskning av biosfärprogrammet ansåg Kärnavfallsrådet att utvecklingen mot en mer mekanistisk representation av processer (som till exempel primärproduktion, växtupptag, och nedbrytning) var ett viktigt komplement till tidigare använda modeller, och SSI såg positivt på utvecklingen av Pandora och verktygets möjlighet att hantera processförståelse. Vidare ansåg SSI att den integrerade landskapsmodellen, som beskriver flera ekosystem i succession, var ett framsteg i utvecklingen av säkerhetsanalysen, men framhöll samtidigt att kopplingen mellan landskapsmodellen och de processbaserade beräkningarna av transport och ackumulation behövde tydliggöras. SSI ansåg vidare att metodiken som använts i SR-Can gav en effekt av utspädning i beräkningarna. Både SSI och Kärnavfallsrådet ansåg det nödvändigt att SKB:s bedömning av riskerna från ett eventuellt utsläpp även omfattar konsekvenserna för miljön, samt att beräkningar av aktivitetskoncentrationer bör förses med osäkerhetsskattningar. Rådet ansåg också att SKB bör bedöma den kemiska toxiciteten av ett slutförvar genom att tillämpa sina modeller för transport och ackumulation i biosfären på stabila ämnen som till exempel tungmetaller.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

För att uppskatta framtida effekter på biosfären av ett hypotetiskt utsläpp från SFR 1, modellerades omsättningen och spridningen av radionuklider i ytnära ekosystem /26-85/. Modelleringen utgjorde en del av säkerhetsredovisningen för SFR 1 /26-93/.

För beräkningarna användes tre ögonblicksbilder av landskapsutvecklingen i Forsmark. Varje landskapskonfiguration bestod av ett antal kopplade objekt (landskapsobjekt) vilka speglade antingen ett akvatiskt (kust eller sjö) eller ett terrest ekosystem (våtmark och jordbruksmark). Representationen av landskapet och transporten av radionuklider följde i stort den metodik som användes i SR-Can /26-94/. Ekosystemmodellerna var med några få undantag desamma som användes i SR-Can, samt i den tidigare säkerhetsanalysen av SFR 1 /26-95/. En separat modell, baserad på jämviktsantaganden, utvecklades för att bedöma ackumulation och exponeringen av kol-14 för framtida människor /26-96/. För att bedöma effekter av ett utsläpp på miljön jämfördes beräknade halter av radionuklider i miljön med gränsvärden enligt Erica-metoden /26-97, 26-98/.

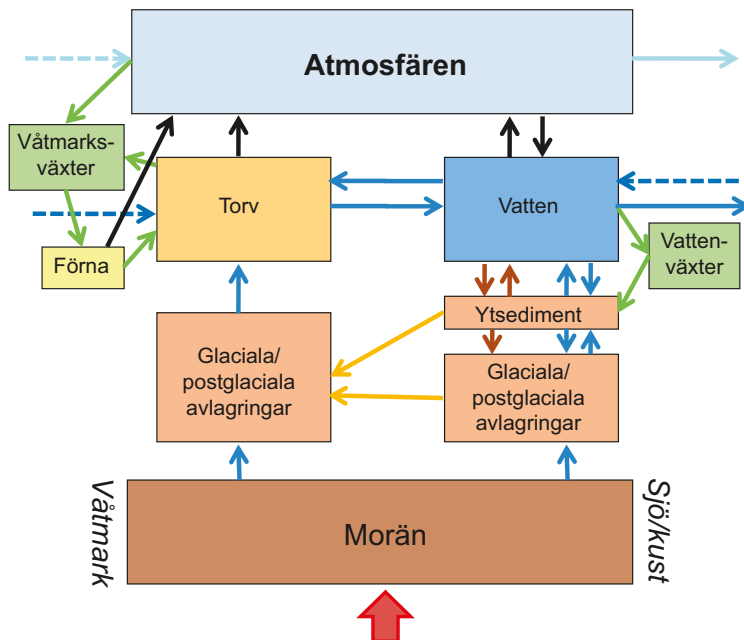
Ett eventuellt utsläpp från förvaret till landskapet och till en brunn beaktades i ett 100 000-årsperspektiv. Kol-14 gav den högsta beräknade dosen till människor via insjöföda, samt via dricksvatten från brunnen vid höga grundvattenflöden (i samband med strandlinjeförskjutningen). Osäkerheten och känsligheten i beräkningarna utvärderades med sannolikhetsbaserade metoder. Skattningarna av de högsta doserna var behäftade med små osäkerheter, eftersom faktorer som styr transport och ackumulation av kol är välkända och kan skattas med god säkerhet. De viktigaste faktorerna för den beräknade exponeringen från förtäring av föda var mängden löst oorganiskt kol och produktionen av växtbiomassa i sjön, samt, för bidraget från dricksvatten, brunnens flödeskapacitet. För samtliga undersökta radionuklider understeg halterna i miljön använda gränsvärden med fem storleksordningar eller mer /26-85/.

SSM har nyligen granskat SKB:s biosfärmetodik i säkerhetsredovisningen för SFR 1 /26-85/. SSM såg positivt på att SKB analyserade effekter på miljön av ett slutförvar, men identifierade ett antal svagheter i den metodik vi använt för radionuklidmodellering. Myndigheten rekommenderade en revision av de antaganden som dosberäkningarna är baserade på, bland annat för att avgöra graden av konservatism i den uppskattade risken /26-86/. Särskilt angeläget ansågs en översyn av metodiken för att bestämma biosfärobjektens storlek, osäkerheter kring avrinningsområdets storlek, samt hanteringen av ackumulation i anslutning till övergångar mellan ekosystem.

SKB har inför säkerhetsanalysen av Kärnbränsleförvaret (SR-Site) vidareutvecklat metodiken för exponeringsberäkningar på ett flertal punkter. Utvecklingen har skett med utgångspunkt från slutsatser i Fud-program 2007, myndighetskommentarer på detta och nyvunnen kunskap. Radionuklidmodellen har implementerats i verktyget Pandora och verktyget Ecolego har använts för att verifiera beräkningarna. Nedan redovisas de viktigaste förändringarna i metodiken för att beräkna. Rapportering av nyvunnen kunskap inom detta område kommer att ske inom ramen för SR-Site.

De viktigaste uppdateringarna av metodiken återfinns i beräkningarna av aktivitetskoncentrationen i miljön. Den nuvarande radionuklidmodellen beskriver hur ett hypotetiskt utsläpp av radionuklider som når de djupaste avlagringarna av ett biosfärobject transporteras och ackumuleras i avlagringar, och därefter omsätts i ytliga marklager, ytvattensystemet och atmosfären, figur 26-8. För beräkningarna antas att hela utsläppet når ett biosfärobject. För varje biosfärobject beskrivs successionen av ekosystem kontinuerligt, som en funktion av landhöjning, sedimentation och igenväxning, se avsnitt 26.8. Övergången mellan hav och sjö beskrivs med en isoleringstid på 500 år, därefter minskar sjöns storlek och djup som en funktion av sedimentation och igenväxning. Akvatiska och terrestra ekosystem förekommer således samtidigt i ett och samma biosfärobject, men storleksförhållandena ändras successivt över tiden. Modellen omfattar omsättningen av organiskt och oorganiskt kol i sjö- och markvatten samt i atmosfären närmast marken, vilket tillåter en dynamisk beskrivning av aktivitetskoncentrationer i växter och miljön.

Befintlig kunskap om platserna har i stor utsträckning använts för att styra modelleringen. Den detaljerade beskrivningen av landskapet och dess utveckling (se avsnitt 26.8) har översatts till enkla parametrar som ytor, medeldjup och sedimentationshastigheter, vilka varierar med tiden. Växtproduktionen och vattenutbytet mellan havsbassänger förändras kontinuerligt tiden, som en funktion av landskaps geometrier och platsdata. Vattenbalanser från detaljerade hydrologiska beräkningar (se avsnitt 26.6) har översatts till enkla horisontella och vertikala flöden, som skalats till ytavrinningen. Biologiska koncentrationsfaktorer (CR) och fördelningskoefficienter (K_d) bygger på fältdata från platserna.



Figur 26-8. Förenklad översiktsbild av förråd och flöden av radionuklider som används för att beräkna aktivitetskoncentrationen i miljön i ett biosfärobject. Den röda pilen representerar ett potentiellt utsläpp och övriga fyllda pilar representerar flöden av radionuklider som drivs av: blå = hydrologiska flöden, svarta = gasutbyte, brun = sedimentation/resuspension, gul = igenväxning av sjön, grön = växtupptag och nedbrytning. Streckade pilar motsvarar oförorenade flöden av luft och vatten.

Vidareutveckling av metodiken för att beräkna den exponering som framtida människor i ett landskapsobjekt utsätts för har också genomförts. För tiden då ett objekt ligger under eller strax över havsytanivån antas människor i objektet livnära sig som jägare/fiskare/samlare. När objektet ligger så högt över havsytan att det går att bedriva ett uthålligt jordbruk, antas att större delen av våtmarken dikas och används som jordbrukmark, alternativt för bete. Exponering beräknas genom att beakta flera exponeringsvägar samtidigt (förtäring, dricksvatten, inandning och extern bestrålning). Den grupp människor som får högst exponering, över alla tidpunkter och landskapsobjekt, utgör den mest exponerade gruppen.

Doskonverteringsfaktorer, det vill säga andelen strålning från ett utsläpp som bidrar till skadlig effekt på en representativ individ i den mest exponerade gruppen, som beräknats med den nuvarande metodiken (SR-Site) har jämförts med resultat från tidigare beräkningsmetodik (SR-97, SR-Can och SAR 08). Observerade skillnader har relaterats till utvecklingen av modellstrukturen, förändringar i parametervärden och antaganden om utsläppets fördelning i landskapet.

Konsekvenser av ett eventuellt utsläpp för miljön har analyserats med utgångspunkt från Erica-metoden /26-97, 26-98/. Doser har i första hand beräknats för organismer som lever på de undersökta platserna. För analysen kombinerades beräknade aktivitetskoncentrationer i miljön (mark, sediment och vatten) med doskonverteringsfaktorer och empiriska överföringsfaktorer från platserna.

En sannolikhetsbaserad analys har använts för att kvantifiera osäkerheten i exponeringsberäkningarna som orsakats av osäkerhet i modellparametrar. Beräkningarnas känslighet för antaganden om den framtida människans bruk av födoresurser har också kvantifierats.

När det gäller kemisk toxicitet för ämnen i det använda bränslet och kopparkapseln bedömer SKB att det inte är motiverat att genomföra ytterligare beräkningar med den metodik som använts för att bedöma den radiologiska risken i säkerhetsanalysen eftersom en pessimistisk överslagsberäkning visat att samtliga ämnen underskrider de jämförande haltkriterierna. Rapportering av denna beräkning sker inom ramen för SR-Site.

Program

SKB kommer att vidareutveckla metodiken för dosberäkningar med utgångspunkt från nyvunnen kunskap från biosfärprogrammet och tillämpningar av metodiken på säkerhetsanalyser. Känslighets- och osäkerhetsanalysen från SR-Site kommer att vara vägledande för denna utveckling.

Med nuvarande metodik för radionuklidmodellering är koncentrationsfaktorer och fördelningskoefficienter (K_d -värden) nyckelfaktorer för osäkerheten i beräknade aktivitetskoncentrationer i miljön, och därmed osäkerheten i den beräknade exponeringen. Den långsiktiga ambitionen är att komplettera empiriska överföringsfaktorer mellan miljön och mänsklig föda med en mekanistisk beskrivning av växtupptag och bioackumulation, se avsnitt 26.5. Denna utveckling är speciellt motiverad för nuklider av vanligt förekommande element i miljön.

Tidigare säkerhetsanalyser av slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR 1) visar att det framför allt är kol-14 som dominerar den beräknade dosen till framtida människor. Inför säkerhetsanalysen av ett utbyggt SFR kommer därför representationen av processer som styr omsättningen av kol, och bakomliggande antaganden, att ses över.

26.10 Nationella samarbeten, internationellt arbete samt informationsspridning

SKB deltar aktivt i ett antal internationella samarbetsföretag som rör radiologisk säkerhet för människa och miljö, bland annat inom ramen för IAEA (International Atomic Energy Agency)-program och EU-projekt, samt inom sammanslutningar som Bioprotect och International Union of Radioecology (IUR). SKB stöder dessutom forskning vid flera universitet och högskolor. SKB anser att det är angeläget att sprida nyvunnen kunskap, samt att göra data och resultat tillgängliga för nationell och internationell granskning, bland annat genom vetenskaplig publicering och aktivt deltagande

i symposier och seminarier. Både SSI och Kärnavfallsrådet ansåg, i granskningen av Fud-program 2007, att det är positivt att SKB har ökat det nationella samarbetet genom nätverket SurfaceNet. Kärnavfallsrådet ser dessutom positivt på SKB:s ökande publicering i vetenskapliga tidskrifter.

26.10.1 Aktiviteter

SKB har följt IAEA:s program för modellering av radiologisk risk i miljön (Emras). Engagemanget inom programmet kommer att öka i Emras II, där SKB från och med år 2010 kommer att stå för ordförandeskapet för arbetsgrupp 3 (WG3). Arbetsgruppens mål är att stödja uppdateringen av IAEA:s rekommendationer när det gäller biosfärmodellering, kopplat till klimat och miljöförändringar, för att bedöma säkerheten för slutförvar av radioaktivt avfall.

SKB har fungerat som referensgrupp för två EU-projekt: Futurae, där bildandet av ledande nätverk inom radioekologi har bedömts, samt Protect, som syftar till en utveckling av gränsvärden för bedömning av radiologisk risk för flora och fauna.

SKB har varit aktivt inom Bioprota, ett internationellt samarbetsprojekt runt nyckelfrågor för bedömning av långsiktig radiologisk säkerhet i biosfären. Deltagare i gruppen omfattar såväl organisationer som gör bedömningar av radiologisk risk (till exempel SKB, Posiva, EDF och Nagra), som granskande myndigheter (till exempel SSM och NDA). I sin tidigare roll som ordförande har SKB uppmuntrat utbyte av information och erfarenheter inom gruppen, och har aktivt deltagit i bland annat arbetsgrupperna för selen och miljöexponering. Inom ramen för Bioprota stödjer SKB en studie av transport av jod i en kanadensisk våtmark. Vi har även deltagit i gruppen för radioaktivt avfall inom IUR.

Samarbetet med Posiva har fortsatt, framför allt inom Bioprota. Även inom Grönlandsprojektet (GAP, se avsnitt 19.6) har SKB samarbetat med Posiva, och med ett antal andra organisationer: NMWO (Kanada), NDA (Storbritannien) samt GEUS (Danmark). Arbetet har varit knutet till fältprovtagningar av ytnära ekosystem under permafrostförhållanden och SKB har anordnat ett antal workshops i anknytning till detta.

SKB fortsätter att redovisa nyvunnen kunskap i vetenskapliga, populärvetenskapliga och fack-tidskrifter, till exempel /26-38, 26-39, 26-40/. Vi har dessutom presenterat data och vetenskapliga resultat vid ett antal internationella och nationella symposier. Bland annat gav SKB en introduktionsföreläsning om samordningen mellan hydrologi och ekologi vid det internationella symposiet för hydrogeologi (IAH) i Lissabon 2007 och denna presentation resulterade även i en vetenskaplig publikation /26-62/. SKB har dessutom bidragit med föredrag och posters vid ett antal olika symposier: ECORAD i Bergen 2008 /26-61, 26-99, 26-29, 26-100, 26-101/, ICEM i Brügge 2007 /26-102, 26-60/, NKS-B FOREST i Helsingfors 2008 /26-28/, 33rd International Geological Congress i Oslo 2008 /26-103/, DHI:s användarkonferens i Dubrovnik 2008 /26-104/ och ESRI:s användarkonferens i Stockholm 2007 /26-105/, samt Svenska OIKOS /26-106/. Medarbetare inom biosfärgruppen är dessutom regelbundet anlitade som granskare av vetenskapliga artiklar.

SKB föreläser årligen om biosfärprogrammet vid flera av landets universitet. Exempelvis har vi föreläst inom påbyggnadsutbildningen i ekotoxikologi och biologi vid Stockholms universitet och inom en doktorandutbildning för radiofysik som anordnas gemensamt av Göteborgs och Lunds universitet. SKB:s kompetens inom biosfärområdet har rådfrågats av bland annat det nationella forskningscentret för miljö och hälsa i Tyskland (GSF) och Svealands Kustvårdsvattensförbund.

SKB har stött forskningsprojekt vid Sveriges lantbruksuniversitet /26-15, 26-16/, Umeå universitet, Stockholms universitet /26-74, 26-75, 26-107, 26-108, 26-77, 26-76/, KTH /26-73/, Chalmers, samt vid Lunds tekniska högskola /26-10, 26-17, 26-18/. Det omfattande dataunderlaget från platsundersökningarna har använts av myndigheter och oberoende forskare vid bland annat Linnéuniversitetet i Kalmar /26-109, 26-27, 26-110, 26-111, 26-112, 26-113, 26-114/, vid KTH och Stockholms universitet samt vid Universidade de Aveiro i Portugal /26-115/. SKB har dessutom stöttat seminarieverksamheten vid det nyinrättade Centret för strålskyddsforskning vid Stockholms universitet.

Program

SKB kommer under den kommande program perioden att fortsatt vara aktiv inom Bioprota, och engagemanget inom Emras II kommer att fortsätta. Resultat och nyvunnen kunskap kommer att spridas via vetenskaplig publicering och ett aktivt deltagande vid internationella symposier, samt via seminarier och föreläsningar vid Sveriges universitet och högskolor. SKB kommer att fortsätta stödja forskargrupper vid inhemska och utländska universitet. Efter att säkerhetsanalysen inför ansökningarna om Kärnbränsleförvaret har avslutats, har vi ambitionen att samlat presentera nyvunnen kunskap om transport och ackumulation av radionuklider i ett landskap under utveckling, till exempel i ett temanummer av en vetenskaplig tidskrift. Vi kommer även fortsättningsvis att bevaka den internationella utvecklingen och utvärderingen av existerande modeller för beräkning av aktivitetskoncentrationer av bland annat C-14 och Ra-226 inom Bioprota.

27 Andra metoder

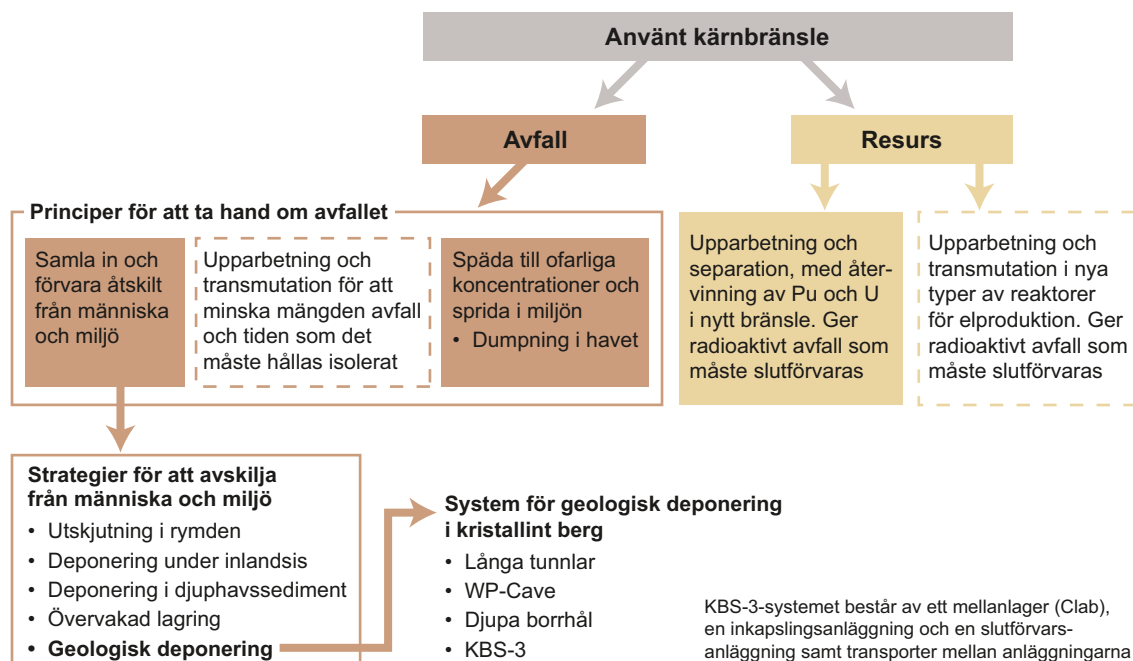
Det finns två tänkbara huvudvägar för hantering av det använda kärnbränslet. Den ena vägen innebär att man betraktar kärnbränslet som en resurs, den andra att man väljer att se det som avfall.

Vissa principer och strategier för hanteringen har, både i Sverige och i andra länder med kärnkraftsreaktorer, avförts från vidare utveckling därför att de uppenbart förefaller olämpliga och/eller praktiskt ogenomförbara. Andra principer och strategier har setts som tillräckligt intressanta för att motivera fortsatta analyser. Sådana analyser har i sin tur efter hand resulterat i att vissa system har befunnits mindre lovande än andra. Fortsatt kunskapsuppbyggnad och utvecklingsarbete om mindre lovande system har lagts åt sidan.

Figur 27-1 illustrerar de principer och strategier för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle som beaktats vid flera tillfällen. De strategier som har aktualitet i dag är:

- Separation och transmutation.
- Geologisk deponering.

Det är möjligt att avsevärt minska mängden av vissa långlivade radionuklider i det använda kärnbränslet genom separation och transmutation. Jämfört med använt kärnbränsle har sönderfallsprodukterna efter transmutation kortare halveringstider eller är till och med stabila. Transmutation är ett forskningsområde som enligt samstämmiga bedömningar kräver ytterligare flera decennier av utvecklingsarbete innan demonstrationsanläggningar kan byggas. Tekniken är således inte tillgänglig i dag, varför en ensidig satsning på separation och transmutation skulle skjuta över ansvaret för att omhänderta det använda kärnbränslet på kommande generationer. Efter separation och transmutation återstår radioaktivt avfall som måste slutförvaras under lång tid, varför man inte kan betrakta detta som en strategi för slutligt omhändertagande. Att använda transmutation enbart för att minska mängden högaktivt långlivat avfall är inte rationellt, varken ekonomiskt eller resursmässigt. Transmutation är i stället en möjlig teknik för att i framtiden utnyttja bränslet mer effektivt i helt nya typer av reaktorer.



Figur 27-1. Principer, strategier och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. Principerna i de streckade rutorna baseras på teknik som inte är tillgänglig i dag.

Det finns ett brett internationellt samförstånd kring principerna för förvaring av använt kärnbränsle och högaktivt avfall, och i flertalet länder med kärnkraft pågår en utveckling av dessa förvarssystem. Metoderna baseras på system med flera barriärer på stora djup i geologiska formationer. Det system som fortfarande av några aktörer förs fram som intressant för svensk del utöver KBS-3-metoden är deponering i djupa borrhål.

Separation och transmutation samt deponering i djupa borrhål beskrivs i avsnitt 27.1 respektive 27.2.

27.1 Separation och transmutation

Forskningen om separation och transmutation (S&T) i Sverige och andra länder söker efter användbara metoder att ta bort eller åtminstone avsevärt minska mängden långlivade radionuklider som måste deponeras i ett slutförvar. De viktigaste långlivade radionukliderna är de så kallade transuranerna, det vill säga grundämnen tyngre än uran. Dessa bildas i kärnreaktorer genom att en eller flera neutroner fångas in av uranatomer, som sedan via radioaktiva sönderfall omvandlas till neptunium, plutonium, americium eller curium. Plutonium utgör cirka 90 procent av den totala mängden transuraner i använt kärnbränsle från dagens lättvattenreaktorer. Även små mängder av ännu tyngre ämnen än curium kan bildas, men dessa är av mindre betydelse i sammanhanget. Några enstaka klyvningsprodukter, till exempel teknetium-99 och jod-129 kan också vara av intresse för transmutation eftersom de har lång halveringstid.

De långlivade radionukliderna kan omvandlas – transmuteras – till mer kortlivade eller stabila nuklider genom kärnfysikaliska processer. I teorin och i laboratorieskala är flera sådana processer möjliga. I praktiken och i större skala har hittills endast bestrålning med neutroner använts för transmutation. Neutroner kan klyva kärnor i transuranatomer, som på så sätt omvandlas till andra nuklider. Transmutation i stor skala av transuraner från använt kärnbränsle måste således ske i anläggningar som i flera avseenden liknar kärnreaktorer. Kärnklyvningsprocessen frigör stora mängder energi som kan användas för kraftproduktion.

En förutsättning för transmutation genom neutronbestrålning är att de nuklider som ska transmuteras, separeras från andra nuklider i det använda bränslet. I synnerhet måste man avlägsna kvarvarande uran om man ska undvika att det bildas mer plutonium och andra transuraner. Separation av de olika ämnena kan åtminstone i princip åstadkommas med mekaniska och kemiska processer. I dag görs detta i stora uppberedningsanläggningar som separerar uran och plutonium från varandra och från övriga ämnen i använt kärnbränsle. Dessa anläggningar kan emellertid inte avskilja de övriga transuranerna – neptunium, americium och curium – från det högaktiva avfall som måste slutförvaras.

Målet för den pågående forskningen om separation (partitioning på engelska) är att finna och utveckla processer som är lämpliga för separation i industriell skala av tyngre transuraner och eventuellt även vissa klyvningsprodukter.

Målet för den pågående forskningen om transmutation är att definiera, undersöka och utveckla anläggningar som är lämpliga för transmutation av de nämnda långlivade radionukliderna i industriell skala.

De processer och anläggningar som kan bli resultat av denna utveckling måste möta mycket höga krav på säkerhet, strålskydd och miljöpåverkan. De måste vara ekonomiskt försvarbara och ge god säkerhet mot avledning av klyvbart material. De stora energimängderna som frigörs i transmutationsprocessen bör tillvaratas. Processerna och anläggningarna måste accepteras av samhället.

Forskning om S&T startade redan på 1950-talet när kärnkraftsutvecklingen tog fart och var under de därpå följande decennierna främst knuten till utvecklingen av blyreaktorer. När denna utveckling minskade till en mycket låg nivå under det tidiga 1980-talet försvann intresset för S&T mer eller mindre. Intresset förnyades under 1990-talet, huvudsakligen inriktat mot acceleratordrivna system (ADS). De senaste åren har emellertid intresset för snabbreaktorer för transmutation återkommit, på grund av nytt intresse för kärnkraft.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKB:s slutsats var och är alltså att transmutation förutsätter fortsatt kärnenergiproduktion i tidskalan 100 år eller mer, det vill säga att energiförsörjningen innehåller kärnkraft och att nya typer av kärnreaktorer avlöser de nuvarande. Vi anser att den slutsatsen styrks av utvecklingen i omvärlden.

Våt separation stod och står alltså i centrum för utvecklingen, även om pyrokemiska processer som utvecklas internationellt kan bli värdefulla för vissa typer av bränslen med höga halter av americium och curium. De svenska arbetena har som tidigare koncentrerats på våt separation och andra metoder bevakats översiktligt.

Genom insatserna på S&T avsåg SKB framför allt att följa den internationella utvecklingen, men också bidra till att upprätthålla den kärntekniska kompetensen i landet. Det har visat sig att kunnskap som utvecklats genom forskning om avancerade kärnbränslecykler och kärnavfallshantering är värdefull och användbar också för utveckling av säkerhet, bränsleförsörjning och avfallshantering för existerande lättvattenreaktorer.

Forskningen om transmutation inriktades på säkerhet, genomförbarhet och tillförlitlighet. Kunskap om material och bränsle har varit viktiga delmål. Betydelsen av att analysera framtida avancerade bränslecykler framhölls. Avsikten var att förutse de olika typer av avfall som kan uppkomma.

SKB tillkännagav även sin avsikt att öka insatserna på området från tidigare fem miljoner kronor per år till mellan sex och sju miljoner kronor för att bättre kunna följa med i EU:s projekt på området. Denna ökning genomfördes sedan.

I den av SKI ledda granskningen av Fud-program 2007, uppmanades SKB att även fortsättningsvis genomföra eller delta i studier av system för separation och transmutation, och SKI hade inget att invända mot den aviserade ökningen av budgeten.

SKI anförde följande skäl för att satsa på separation och transmutation:

- För att SKB:s program ska vara så allsidigt som kärntekniklagen kräver.
- Sverige måste aktivt följa utvecklingen för att kunna bedöma teknikens möjligheter.
- Medverkan i det internationella arbetet ger kunskap åt såväl kärnavfallsprogrammet som andra delar av kärntekniken.
- Att härigenom vidmakthålla nivån på forskning i kärnteknik kommer hantering av befintligt avfall till godo.

SKB konstaterar att detta ligger helt i linje med den valda inriktningen.

Även Kärnavfallsrådet ansåg att den av SKB skisserade nivån för insatser inom området separation och transmutation är väl avvägd och anslöt sig till bedömningen att transmutation förutsätter en mycket långvarigare satsning på kärnenergi.

Kärnavfallsrådet konstaterar att även separation och transmutation leder till långlivat avfall, om än i mindre volymer. Det är helt riktigt att såväl högaktivt som långlivat avfall är oundvikliga restprodukter i alla de lösningar som hittills har föreslagits. Det är inte ens säkert att volymerna minskar. Räknar man in långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer volymerna troligtvis att öka, ty bearbetningen av avfallet alstrar även en andel sekundärt avfall. För att hålla ner volymen sekundärt avfall krävs särskilda ansträngningar. Ett exempel på detta är utvecklingen av ”askfria” separationskemikalier, som endast består av elementen kol, väte, syre och kväve.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

En referensgrupp av svenska forskare har på uppdrag av SKB utarbetat en rapport om läget för forskningen över S&T i början av 2010 /27-1/. Underlaget för den följande korta sammanfattningen av kunskapsläget är hämtad från denna rapport. Rapporten sammanfattar utvecklingen sedan år 2007 då en liknande rapport utarbetades för SKB:s räkning /27-2/. För en utförligare redovisning av kunskapsläget hänvisas till dessa rapporter och årsrapporterna /27-3 till 27-10/.

Intresset har under de tre senaste åren svängt från ADS tillbaka till att använda snabba kritiska reaktorer för transmutation. Det råder i dag enighet om att ett spektrum av snabba neutroner behövs för att effektivt transmutera transuraner. Dessa förhållanden kan emellertid åstadkommas med såväl snabba blyreaktorer som ADS. Accelerator drivna system ses numera oftast som en metod att behandla kvarvarande mindre aktinider, som till exempel americium, efter att huvuddelen av transuranerna och särskilt plutonium transmuterats genom återcykling i lättvattenreaktorer samt snabba reaktorer. Den gemensamma europeiska intresseorganisationen SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) har antagit en strategisk forskningsplan i vilken utveckling och byggnation av en natriumkyld snabbreaktor för transmutation har fått högsta prioritet. Design av en sådan reaktor pågår.

I Europa samlas intresset till forskningsprogrammen inom EU. De så kallade ramprogrammen inom EU är starkt kopplade till de nationella programmen i medlemsländerna och några andra europeiska stater. Andra omfattande program pågår bland annat i Japan, Ryssland och USA.

Eurotrans var det största europeiska projektet direkt inriktat på transmutation. Förutom Eurotrans pågår ett antal mindre forskningsprojekt där olika delfrågor studeras. Vart och ett är betydligt mindre än Eurotrans, men sammanlagt utgör de en jämförbar forskningsvolym. Eurotrans startade i april 2005 för att pågå i fyra år med en budget på 43 miljoner euro, varav drygt hälften betalats av European Commission (EC). Projektet samlade 47 organisationer från 14 länder, varav 10 representerade industrin, 19 forskningscentra och 17 europeiska universitet. Universitetet representerades kollektivt i projektorganisationen av Enen (European nuclear engineering network). Sverige representerades av KTH i Stockholm och av gruppen för neutronforskning vid Uppsala universitet. Projektet var inriktat på accelerator driven transmutation och behandlade frågor som utformning, koppling mellan accelerator och underkritisk reaktorhård, utveckling av transuranbränsle, material egenskaper vid kylning med flytande bly-vismut och bestrålning med snabba neutroner samt frågor om grundläggande kärndata.

Den internationella forskningen inom separation har två huvudlinjer: vattenkemiska processer och pyrokemiska processer. I Europa samlas insatserna inom EU-projektet Acsept (Actinide recycling by separation and transmutation) som startade år 2008 och avslutas 2012. Detta är ett så kallat kollaborativt projekt inom EU:s sjunde ramprogram och utgör en fortsättning på projektet Europart inom det föregående ramprogrammet. Projektet har en total budget om 23,8 miljoner euro, varav EC tillskjuter 9,0 miljoner euro. Acsept behandlar frågor om vattenkemi, pyrokemi, processutveckling samt utbildning och träning. Från Sverige medverkar kärnkemigruppen vid Chalmers.

Internationellt har S&T fortfarande en framträdande position inom forskning och utveckling av framtida kärnkraft och kärnbränsle. Det tilldrar sig betydande intresse bland studenter inom kärntekniska ämnen. Intresset inom kärnenergiindustrin har ökat med den ökande uppmärksamheten på snabba reaktorer. S&T ses som en intressant möjlighet för framtida energisystem baserade på avancerade kärnreaktorer, avancerat kärnbränsle och avancerade kärnbränslecykler. En lyckad utveckling av S&T inom ramen för avancerade bränslecykler kommer emellertid inte att eliminera behovet av slutförvar för högaktivt och långlivat avfall. Dessutom genererar separationsprocesserna avfallsflöden som tenderar att öka volymerna av högaktivt kortlivat (främst Cs och Sr) och långlivat låg- och medelaktivt avfall. Allt detta måste beaktas i ett fullständigt system.

Relaterat till forskningen kring transmutation har vi även låtit genomföra en mindre studie av fusion som källa till snabba neutroner /27-11/. Om utvecklingen av fusion blir framgångsrik skulle detta kunna vara en intressant möjlighet för transmutation.

Program

Målet för SKB:s forskning rörande separation och transmutation av långlivade radioaktiva ämnen är oförändrat och innefattar 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 hand om kärnbränsleavfallet från de svenska kärnkraftverken.

Underlag tas fram fortlöpande enligt årliga verksamhetsplaner. Samlade bedömningar sker inför viktiga beslut i kärnavfallsprogrammet. För perioden år 2011 till 2013 beräknas SKB:s årliga budget för dessa insatser ligga oförändrat på mellan sex och sju miljoner kronor. SKB har varit den huvudsakliga finansören av forskning inom S&T i Sverige från år 1995 fram till slutet av 2009. I oktober 2009 beviljade emellertid Vetenskapsrådet 36 miljoner kronor till forskningsprojektet Genius (Generation IV-forskning), vilket handlar om forskning kring nästa generation kritiska reaktorer. Sådana reaktorer har potential för effektiv transmutation. I och med Vetenskapsrådets satsning har alltså den svenska aktiviteten på transmutationsområdet ökat.

Våra 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. Det är oklart vilket stöd som verkligen blir tillgängligt i framtida program. Det bör poängteras att EU:s finansiering även beror på den politiska situationen i länder med starkt negativ kärnkraftsopinion. Så länge S&T sågs som synonymt med ADS var även kärnkraftsskeptiska länder villiga att stödja detta åtminstone i någon utsträckning, eftersom man såg detta som en ”uppstädning” snarare än en väg till fortsatt kärnkrafts-användning. Inom kommissionen synes man förvänta sig en oförändrad nivå av medel till ADS-forskning under överskådlig tid, medan medlen till forskning om snabba reaktorer skulle kunna öka.

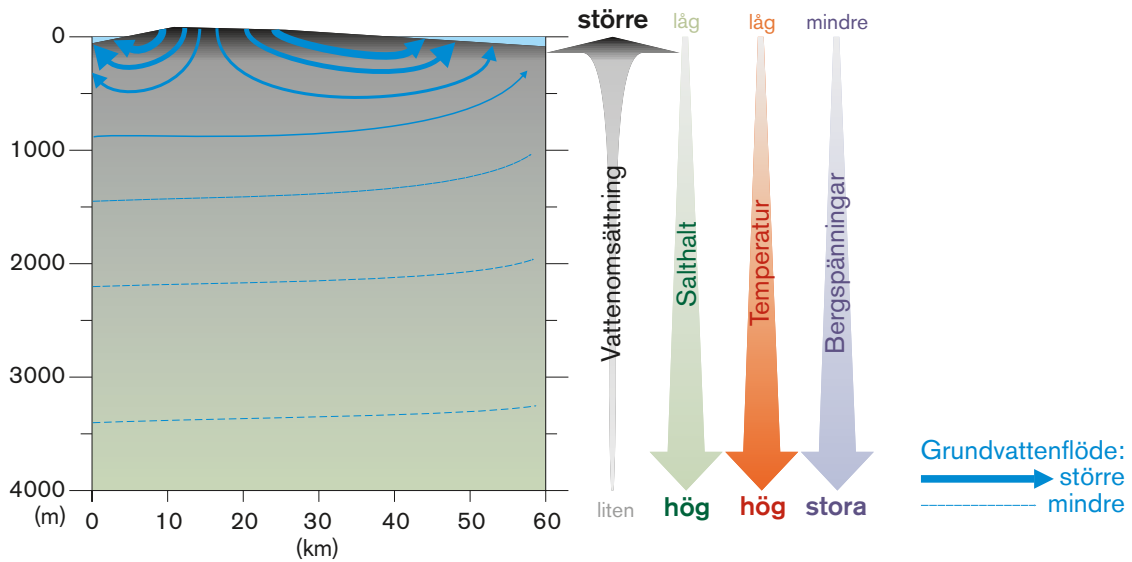
Utvecklingen internationellt förväntas ske mot att använda snabba reaktorer för att åstadkomma transmutation och intresset för ADS blir jämförelsevis svagare. Mycket av detta beror på insatserna för fjärde generationens reaktorsystem där även snabba reaktorer ingår. Till exempel har Frankrike aviserat att beslut kan fattas år 2012 om att bygga den natriumkylda snabbreaktorn Astrid /27-12/, sid 10/. Frågor om material och bränsle är även fortsättningsvis centrala för säkerhet, genomförbarhet och tillförlitlighet. För svenskt vidkommande är det också viktigt att se vilka processer som kan komma att ingå i framtida avancerade kärnbränslecykler, så att man kan identifiera och beskriva de olika typerna av radioaktivt avfall som kan uppkomma.

Vattenbaserad separation förväntas tilldra sig det mesta av intresset internationellt. De svenska arbetena kommer att koncentreras på detta, medan andra metoder som pyrokemisk separation bevakas översiktligt. Vätskeextraktion, som används i de vattenbaserade metoderna, är en effektiv och välkänd metod som uppfyller högt ställda krav på renhet hos de separerade faserna och små förluster. Pyrokemisk separation kan däremot vara fördelaktig för bränsle med hög utbränning, bland annat genom att erbjuda lägre risk för kriticitet.

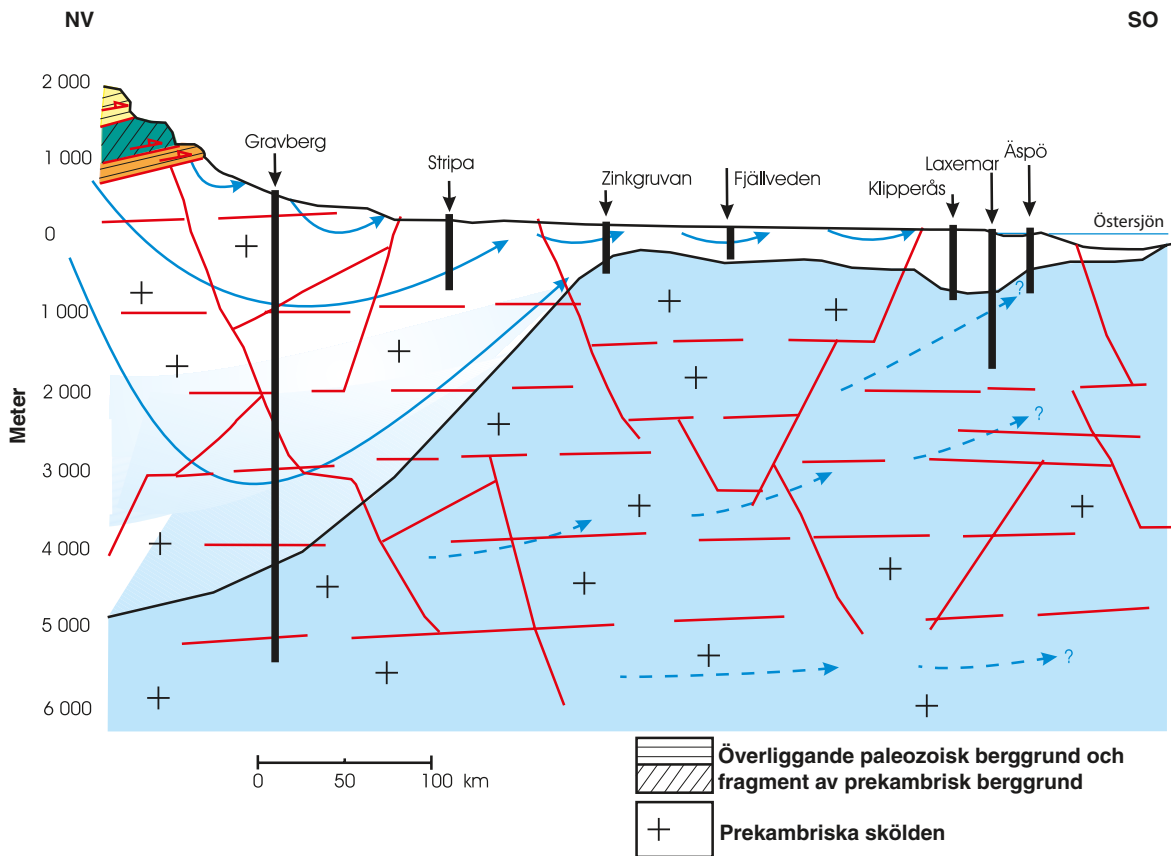
27.2 Djupa borrhål

Konceptet deponering i djupa borrhål innebär att kapslar med använt kärnbränsle placeras i borrhål på 2–4 kilometers djup och beskrivs i /27-13/. De övre två kilometrarna av borrhålen försluts. I konceptet har kapslarna en diameter av 500 millimeter och rymmer fyra BWR-element alternativt ett PWR-element och kräver att borrhålens diameter på förvarsdjup måste vara cirka 800 millimeter. Arealbehovet styrs av avståndet mellan borrhålen, mängden bränsle som ska deponeras och storleken på kapslarna. Det är osäkert hur nära varandra hålen kan ligga. I tidigare studier har ett avstånd av 500 meter antagits vara nödvändigt med hänsyn till risken för ”kollision” mellan borrhål som avviker från vertikal riktning och till värmeutvecklingen i det deponerade bränslet. Med detta avstånd och under förutsättning att borrhålens diameter på förvarsdjup är cirka 800 millimeter, skulle ett slutförvar som rymmer avfallet från driften av de svenska kärnkraftverken kräva en sammanlagd yta av drygt 13 kvadratkilometer (60 hål). Om avståndet mellan borrhålen halveras så minskas arealbehovet till drygt tre kvadratkilometer.

Vid 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 stagnanta på stora djup. Anledningen till de stagnanta förhållandena är att grundvattnet har hög salthalt (och därmed också hög densitet) och därför ogärna blandar sig med det lättare sötvattnet som ligger ovanför. Figur 27-2 visar översiktligt hur egenskaper som vattenomsättning, salthalt, temperatur och bergspänningar förändras med djupet. Ett förslag på en konceptuell modell för de översta fem kilometrarna av berggrunden i Sverige finns i figur 27-3 /27-14/. De eventuella grundvattenrörelser som sker på stort djup tros inte ha någon kontakt med markytan. Därmed skulle heller inte några radioaktiva ämnen från deponerat använt kärnbränsle kunna föras upp till ytan med grundvattnets hjälp.



Figur 27-2. Översikt över hur den svenska berggrundens egenskaper förändras med djupet.



Figur 27-3. Vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil från norra Dalarna till östra Småland /27-14/.

Slutsatser i Fud 2007, kompletteringen av Fud 2007 samt granskningen av dessa

SKB gjorde samma bedömning i Fud-program 2007 som i Fud-program 2001 och 2004. Ingenting talar för att deponering i djupa borrhål skulle 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.

I Fud-program 2007 framförde SKB att man senast i samband med ansökningstillfället för Kärnbränsleförvaret kommer att presentera en jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål.

Vad gäller fortsatt arbete, framförde SKB att man kommer att fortsätta följa utvecklingen inom ämnesområdet djupa borrhål. Motiv saknas däremot för att genomföra något eget forskningsprogram inom området. Resurserna koncentreras i stället på att realisera ett slutförvar enligt KBS-3-metoden.

SSI framförde att SKB bör utreda konceptet djupa borrhål ytterligare, för att bedöma om det är utvecklingsbart och jämföra det med KBS-3-metodens långsiktiga skyddsförmåga.

SKI stödjer SSI:s synpunkt att underlaget för jämförelse med förvar i djupa hål behöver förstärkas till ansökan samt att detta kan följas upp inom ramen för samråden. Dessutom erinrar SKI om att ett förvarskoncept, som redan från början bygger på enbart berget som barriär strider mot SKI:s föreskrifter.

Av regeringsbeslutet den 20 november 2008 med anledning av SKB:s Fud-program 2007 framgår bland annat att SKB ska ”redovisa kunskapsläget vad gäller alternativa slutförvaringsmetoder såsom bland annat djupa borrhål”. Detta gjordes i den komplettering av Fud-program 2007 som SKB lämnade till regeringen i mars 2009.

I Fud-program 2007 ingick en orientering om i vilken utsträckning SKB följer det internationella forsknings- och utvecklingsarbetet kring de båda koncepten separation och transmutation samt deponering i djupa borrhål. Redovisning av kunskapsläget om alternativa slutförvaringsmetoder i kompletteringen av Fud-program 2007 är i första hand fokuserad på sådana system inom strategin geologisk deponering som SKB har funnit skäl att antingen bearbeta vidare eller att följa kunskapsutvecklingen kring, det vill säga KBS-3-metoden och konceptet deponering i djupa borrhål /27-15/. Vidare redovisas kunskapsläget för separation och transmutation samt för övervakad lagring med fokus på så kallad Dry Rock Deposit.

I sitt yttrande över kompletteringen av Fud-program 2007 framför SSM synpunkter på redovisningen av alternativa metoder. SSM anser, i likhet med flera remissinstanser, att SKB bör ta fram ett fördjupat underlag för deponering i djupa borrhål. Man efterlyser dels en fördjupad expertbedömning kring genomförbarhet (borrteknik och deponering), dels en utförligare analys av osäkerheterna kring grundvattnets stabilitet på stora djup. Man menar att dessa ytterligare utredningar är nödvändiga för att kunna göra en systematisk jämförelse av deponering i djupa borrhål med KBS-3-metoden.

Enligt SKB:s uppfattning kan en utförligare analys av grundvattnets stabilitet på stora djup endast genomföras i kvalitativa termer. Som utgångspunkt kan vi konstatera att utfallet av en sådan analys är helt beroende av såväl förhållandena kring ett djupt borrhål som av förhållandena i själva borrhålet. Det är också beroende av den specifika situationen i ett geografiskt större område samt kommande klimatförhållanden. Den kvalitativa analysen kan ta fasta på i dag rådande förhållanden och resonera kring möjliga framtida förändringar. Allmän kunskap i dag är att grundvattnets kemi förändras mot djupet och att grundvattnet på flera kilometers djup ofta, men inte alltid, är salt. Från SKB:s egna undersökningar i det 1 700 meter djupa borrhålet i Laxemar vet vi att salthalten ökar kraftigt i intervallet 900–1 700 meter. Vi ser också att salthaltsökningen mot djupet är starkt korrelerad till avståndet till havet. I andra områden, som till exempel Klipperås som ligger endast cirka 100 kilometer söderut, kan man på 700 meters djup inte se någon ökning i salthalt hos grundvattnet. Skillnaden mellan Äspö-Laxemar och Klipperås är att Klipperås inte varit havstäckt efter den senaste glaciationen. I dagsläget kan vi konstatera att detta är en möjlig förklaring till observationen av olika salthalter i grundvattnet, men vi vet inte om andra faktorer ligger bakom. Det är också i dag ökänt hur grundvattnets stabilitet på stora djup påverkas vid en framtida nedisning eller en jordbävning.

SSM framförde även att SKB bör ta fram en fördjupad expertbedömning kring genomförbarhet (borrteknik och deponering) av deponering i djupa borrhål. En sådan kommer att ingå i den över- siktliga jämförelsen mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål som SKB kommer att presentera i samband med ansökningstillfället för Kärnbränsleförvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2007

Nya utredningar om djupa borrhål

Inget land förordar deponering i djupa borrhål som förstahandsalternativ för att ta hand om använt kärnbränsle. Under år 2008 och 2009 har rapporter om arbete inom ämnesområdet kommit från Storbritannien, Kanada och USA. Huvudsakligen diskuteras deponering i djupa borrhål av speciella avfallstyper med små volymer, till exempel plutonium från skrotning av kärnvapen.

Storbritannien

Under år 2008 publicerades en studie på uppdrag av den statliga myndigheten NDA (Nuclear Decommissioning Authority) i Storbritannien /27-16/. Den är inriktad på borrtkniska frågeställ- ningar. Frågor kring inkapslings- och deponeringsteknik skulle behöva studeras ytterligare innan det går att ta ställning till om konceptet kan vara gångbart. Den övergripande slutsatsen i studien är att konceptet djupa borrhål för Storbritanniens del, under vissa förutsättningar, kan ha trovärdighet, men att ett stort utvecklingsarbete skulle krävas, både vad gäller borrtknik och teknik för deponering.

Tekniken för borring på stora djup har utvecklats starkt inom oljeborrningsindustrin under de senaste 25 åren. Erfarenheterna gäller dock hål med mindre dimensioner och främst i sedimentär berggrund. Några erfarenheter från borring av djupa hål med stora diametrar och i urberg (kristallin berggrund) finns inte.

Av störst intresse för svensk del är bland annat bedömningarna av problemen med att:

- sätta ner foderrör i hålen,
- cementera spalten mellan foderrör och berg,
- ha kontroll på djupet vid nedsänkning av kapslarna, så att dessa inte skadas.

Vidare konstaterades att enbart helt vertikala hål bör övervägas. Möjligheterna att borra sådana djupa hål har bedömts för fyra olika diametrar: 300, 500, 750 och 1 000 millimeter fri innerdiameter i foder- rören. Det betyder att det borrade hålets diameter behöver vara 20–50 procent större. Med dagens erfarenhet och befintlig utrustning bedöms det vara möjligt att borra hål med fri innerdiameter på 300 millimeter ned till ett djup på 4 000 meter. Även hål med fri innerdiameter 500 millimeter bedöms kunna borraras ned till 4 000 meter med dagens teknik och vidareutvecklad utrustning, men det finns ännu ingen erfarenhet av detta.

Hål med fri innerdiameter på 750 och 1 000 millimeter bedöms i dag inte vara möjliga att borra till 4 000 meters djup. För dimensionen 750 millimeter bedöms det finnas möjlighet att nå ned till 3 000 meter under gynnsamma förhållanden.

En annan rapport som togs fram på uppdrag av NDA år 2008, beskriver alternativ för geologisk deponering av långlivat högaktivt avfall och använt kärnbränsle som eventuellt skulle kunna användas i Storbritannien /27-17/. Tolv olika koncept för geologisk deponering beskrivs i rapporten, bland annat deponering i djupa borrhål. Beskrivningen omfattar utformning, ursprung, mognadsgrad, konstruktions-, drift- och miljöaspekter samt vilka länder som har med konceptet i sina program. Det framgår även vilka geologiska miljöer som bedöms vara lämpliga för respektive metod.

I rapporten konstateras att de utvärderingar som gjorts av konceptet djupa borrhål har fokuserat på möjligheterna att borra djupa hål. Däremot har inte mycket gjorts beträffande deponeringsteknik eller hanteringen av det använda kärnbränslet. Man framför att det råder oklarheter vad gäller säkerheten vid hanteringen av kapslar och pekar bland annat på risker att skada kapslarna när de placeras ovanpå varandra. Den största nackdelen med konceptet djupa borrhål bedöms vara att det saknas såväl en detaljerad utformning som en utförlig utvärdering av säkerheten.

Slutsatsen i rapporten är att deponering i djupa borrhål lämpar sig bättre för mindre mängder högaktivt avfall och klyvbart material, än för deponering av använt kärnbränsle.

Kanada

NWMO (Nuclear Waste Management Organization) i Kanada har gjort en sammanställning av metoder för att ta hand om använt kärnbränsle /27-18/. Vad gäller konceptet djupa borrhål konstaterar NWMO att ingen praktisk demonstration har skett och att mycket forskning och utveckling skulle krävas för att få kunskapen till samma nivå som finns för ett KBS-3-liknande förvar. Man konstaterar dessutom att övervakning och återtag skulle vara mycket svårare för konceptet djupa borrhål.

I rapporten beskrivs även ett alternativt utförande av djupa borrhål, som utvecklats för lagring av koldioxid. Konceptet innebär att hålet kröks vid cirka 3 000 meters djup, så att det blir nästan horisontellt. Detta utförande skulle enligt rapporten minska påkänningen på de lagrade kapslarna, underlätta återtag och möjliggöra övervakning och kontroll under lång tid.

Konceptet bygger på att det djupare hydrogeologiska systemet är isolerat från systemet nära ytan. Sådana geologiska områden går enligt rapporten att hitta i västra Kanada.

USA

Sandia, ett av USA:s energidepartements energilaboratorier, har nyligen publicerat en rapport om deponering av radioaktivt avfall i djupa borrhål /27-19/.

I rapporten föreslås hålen vara fem kilometer djupa med 445 millimeters diameter på förvarsdjup. Sådana hål kan enligt rapporten borraras med befintlig borrarutrustning av den typ som används vid borrhållning av geotermiska borrhål. Deponering sker på mellan tre och fem kilometers djup. Efter deponeringen tätas den övre delen av hålen. Avståndet mellan hålen föreslås vara 200 meter. Hålen fodras med foderrör, som har invändig diameter av 381 millimeter. Kapslarna görs av stålrör med 340 millimeters diameter, med ett bränslepaket (PWR eller BWR) i varje kapsel. Kapslarna ska vara tillräckligt starka för att tåla hanteringen under deponeringen, men behöver inga andra isolerande egenskaper gentemot det radioaktiva avfallet.

Deponeringen av kapslar sker i kristallint berg. Ovanliggande lager kan utgöras av sedimentära formationer. Sådana formationer finns på flera ställen i USA, varför slutförvaring kan ske på flera platser i anslutning till lokala lager och kärnreaktorer. Därigenom minskas transportbehovet.

Den preliminära bedömning som redovisas i rapporten är att deponering i djupa borrhål kan ha god potential med tanke på den långsiktiga säkerheten. I rapporten identifieras funktioner, händelser och processer som kräver fortsatt forskning och utveckling. Däremot finns det ingen analys av hur kapslarna med det radioaktiva avfallet ska kunna deponeras i borrhålet på ett säkert sätt.

Program

SKB:s bedömning från tidigare Fud-program kvarstår, det vill säga att deponering i djupa borrhål inte är en realistisk metod för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle.

I enlighet med utfästelserna i Fud-program 2007 pågår dessutom arbete med att ta fram en rapport som redovisar en jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål. Rapporten kommer att, tillsammans med övrig dokumentation som motiverar SKB:s val av KBS-3-metoden, presenteras i samband med ansökningstillfället för slutförvarssystemet.

SKB avser ändå att även fortsättningsvis bevaka utvecklingen inom ämnesområdena borrhållning och deponering i djupa borrhål.

Del V

Samhällsvetenskaplig forskning

- 28 Översikt – samhällsvetenskaplig forskning
- 29 Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter
- 30 Beslutsprocesser
- 31 Opinion och attityder – psykosociala effekter
- 32 Omvärldsförändringar

28 Översikt – samhällsvetenskaplig forskning

Sedan år 2004 bedriver och finansierar SKB forskning inom det samhällsvetenskapliga området. Forskningsresultaten har bidragit till en djupare förståelse av historiska, ekonomiska och opinionsmässiga aspekter. Samhällsforskningen har bidragit till att öka den allmänna kunskapsbasen och har även kommit till användning i SKB:s praktiska arbete.

När SKB har lämnat in en ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken för KBS-3-systemet kommer de att hanteras inom ramen för det demokratiska systemet, lokalt och nationellt. SKB vill därför, för bland annat beslutsfattare och allmänhet, även kunna presentera ett från ansökningarna fristående underlag som kan ge en bred belysning av viktiga samhällsaspekter.

Under de åtta förstudier som SKB genomförde åren 1993–2000 ägnades samhällsaspekterna ett betydande intresse. I förstudierapporterna 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. Det har under tiden för förstudierna även publicerats andra rapporter som berör samhällsvetenskap /28-1 till 28-3/.

Kärnavfallsrådet identifierade tidigt behovet av en kvalificerad samhällsvetenskaplig forskning inom kärnavfallsområdet. Det skedde bland annat i samband med granskningen av Fud-program 2001. Behovet av ökad kunskap om kärnavfallsfrågans samhälls- och demokratiaspekter har också framförts av de berörda kommunerna.

Kärnavfallsrådet 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 Kärnavfallsrådet och bidragit till ett förbättrat kunskapsläge /28-4 till 28-9/. Kärnavfallsrådet har, med sin breda kompetens, stora möjligheter att även fortsättningsvis verka för att samhällsfrågorna behandlas på ett kvalificerat sätt inom forskningen.

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.

Huvudinriktningen för de forskningsområden som vi stödjer är mot tillämpad forskning men det kan även finnas gränssnitt mot grundforskning. De olika forskningsområdena och de forskningsprojekt som slutförts sedan Fud-program 2007 presenteras närmare i kapitel 29 till 32.

Som ett förberedande arbete inför uppbyggnaden av ett program för samhällsvetenskaplig forskning kartlade SKB under år 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 inbjudna forskare, representanter från kommuner, myndigheter och Kärnavfallsrådet bidrog med värdefulla synpunkter på programmets upplägg och innehåll.

Deltagarna vid de förberedande seminarierna bidrog i hög grad till att identifiera fyra generella forskningsområden som relevanta för avfallsfrågan och för kommunerna:

- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter.
- Beslutsprocesser.

- Opinion och attityder – psykosociala effekter.
- Omvärldsförändringar.

Det är viktigt att notera att forskningsprojekten i många fall spänner över flera av forskningsområdena och att vissa projekt lika naturligt skulle kunna höra hemma inom till exempel området Opinion och attityder som inom området Beslutsprocesser eller Omvärldsförändringar.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI konstaterade att SKB:s samhällsforskningsprogram bidragit till en helhetsbild av arbetet med att slutligt omhänderta det använda kärnbränslet. Vidare anser SKI att den forskning som finansierats genom programmet omfattar ett brett samhällsvetenskapligt fält och ger ytterligare kunskap och insikt om tidigare frågor. Oskarshamns kommun anser bland annat att programmet är ambitiöst och har en vällovligen bredd. SKI vill att SKB ytterligare ska klargöra hur relationen mellan samhällsforskning, tillståndsansökningarna, MKB-dokument och utredningar ser ut. Man saknar en tydlig koppling till den kunskapsbas som finns som ett resultat av det arbete som SKB genomfört under förstudieskedet och de utredningar och den forskning som genomförts av andra aktörer, till exempel Kärnavfallsrådet. Vidare frågar SKI hur den forskning som genomförts under SKB:s tidigare samhällsforskningsprogram relaterar till nu genomfört arbete.

Kärnavfallsrådet, Östhammars kommun och miljörelsen efterlyser ett forskningsprogram som är fristående från SKB. Kärnavfallsrådet anser att programmet bör kompletteras med studier om framtida ekonomiska konsekvenser av kärnavfallsfrågans hantering, främst ekonomiska kostnadsnyttanalyser. Ett annat forskningsfält som Kärnavfallsrådet bedömer som särskilt angeläget är omvärldsförändringar och säkerhetskultur. Rådet understryker också vikten av att samhällsforskningsprogrammet bör fortsätta även efter att ansökan lämnats in.

Relationen mellan forskning och övriga dokument

SKI vill att SKB ytterligare ska klargöra hur relationen mellan samhällsforskning, tillståndsansökningar, MKB-dokument och utredningsverksamheten ser ut.

MKB-dokumentet ska beskriva den sökta verksamhetens konsekvenser för människa och miljö. Syftet med samhällsforskningsprogrammet är att belysa olika samhällsaspekter och ge breddat kunskapsunderlag om politiska och sociala aspekter inför prövningen av Kärnbränsleförvaret. Målgruppen är framför allt beslutsfattare, lokalt och nationellt. Programmet är fristående från såväl MKB som ansökningar.

Forskning och utredningar arbetar utifrån olika förutsättningar. Jämfört med de samhällsutredningar som genomförts inom ramen för förstudierna och platsundersökningarna, är samhällsforskningen inte i första hand kommunspecifik 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 av teorier och en hög grad av självständighet när det gäller att formulera forskningsfrågor, välja metodik och att dra slutsatser utifrån erhållna resultat. Forskning och utredningar skiljer sig även när det gäller granskningsförfarandet. Forskningen genomgår sedvanlig akademisk granskning och granskas även via Fud-program, av beredningsgruppen (se stycke Beredningsgruppen) och vid öppna seminarier. När det gäller utredningar sker granskningen av beställaren SKB och berörda kommuner.

Genom att både samhällsforskningen och samhällsutredningarna ofta behandlar samma ämnesområden är det i vissa fall fruktbart med en ömsesidig kunskaps- och erfarenhetsöverföring, men detta är inte ett ändamål i sig. Det finns ingen direkt koppling mellan de utredningar och den forskning som genomförts av SKB under förstudierna och platsundersökningarna, eller av andra aktörer till exempel Kärnavfallsrådet.

Resultaten från forskningen kommer kommunerna till del genom att de regelbundet redovisas vid öppna seminarier, genom publicering av artiklar i forskningsprogrammets årsbok och projektens slutrapporter samt genom informationsförmedling via SKB:s webbplats.

SKI frågar hur forskning som genomförts inom SKB:s tidigare forskningsprogram relaterar till det nuvarande programmet. Samhällsforskningsprogrammet startade 2004 efter två års förberedande arbete i vilket både forskare och representanter från berörda kommuner deltog för att identifiera intressanta forskningsområden. SKB har alltså inte drivit något program innan dess.

Kärnavfallsrådet föreslår att forskningsprogrammet kompletteras med studier av framtida ekonomiska konsekvenser av kärnavfallsfrågans hantering och ett forskningsfält som belyser omvärldsförändringar och säkerhetskultur. Rådet anser också att programmet bör fortsätta efter att ansökan lämnats in.

SKB avser att under år 2011 ta fram en rapport som ger en sammanfattande värdering av samhällsforskningsprogrammets hittillsvarande verksamhet samt de behov av framtida forskning som kan finnas. En engelsk version kommer även att tas fram. Ett viktigt tillfälle för att få till stånd en internationell validering av programmet är vid den internationella konferens som äger rum våren 2011. Först därefter görs en bedömning av framtida forskningsbehov utifrån de nya förutsättningar som gäller, under och efter, tillståndsprovning och beslut.

Arbetsformer

Samhällsforskningsprogrammet genomförde den första utlysningen av forskningsmedel år 2004 och programmet har sedan successivt byggts upp i dialog med bland annat berörda kommuner. Programmet har varit öppet för nya frågeställningar som aktualiserats under åren. Några remissinstanser, till exempel Kärnavfallsrådet, vill att samhällsforskningen finansieras av andra aktörer än SKB. Det skulle vara till gagn för hela forskningsfältet om även andra aktörer än SKB tog initiativ till att finansiera samhällsforskning. Hur en industri rent praktiskt arbetar med ett forskningsprogram är viktigt. Om inte forskarvärlden och omvärlden i övrigt uppfattar de vetenskapliga resultaten som självständiga i förhållande till finansören, kan de förlora mycket av sitt värde. Oberoende av om ett projekt finansieras av ett forskningsråd, ett universitet, en intressegrupp eller en industri ska forskningsresultaten bli desamma, om övriga faktorer är konstanta.

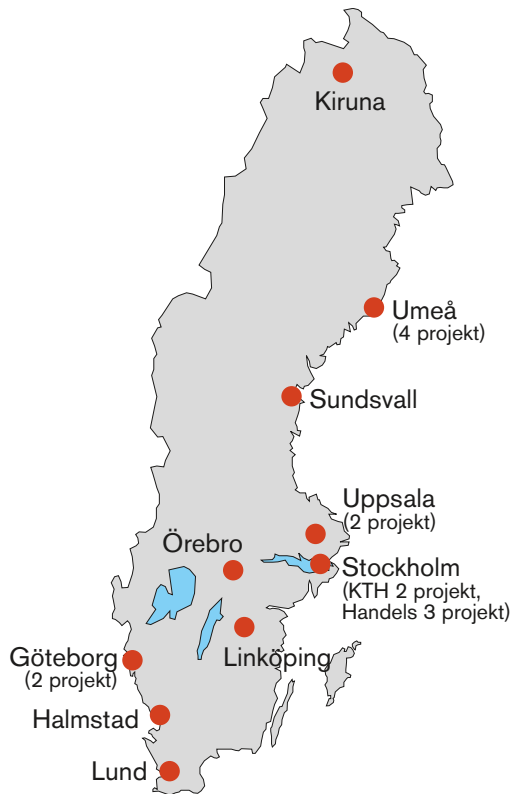
De forskare som engagerats för olika forskningsuppgifter formulerar själva sina forskningsfrågor och ansvarar för metodik, resultat och slutsatser. En tydlig roll- och uppgiftsfördelning i kombination med en väl fungerande forskningskommunikation skapar förutsättningar för en fristående forskning. De arbetsformer som har etablerats för samhällsforskningsprogrammet syftar till att åstadkomma detta.

Utlysningar

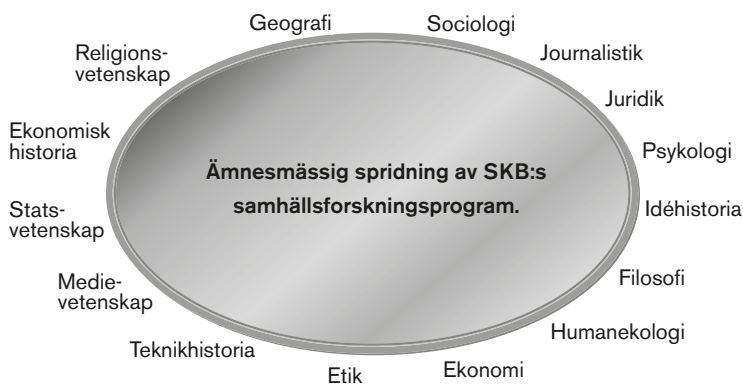
En första inbjudan att komma in med idéskisser och projektbeskrivningar inom de fyra övergripande forskningsområdena skickades våren 2004 ut till ett antal högskolor och universitet. Åtta forskningsprojekt prioriterades i denna första ansökningsomgång. Ytterligare utlysningar genomfördes sedan årligen mellan 2005 och 2009. Inbjudan riktades då till samtliga universitet i Sverige. Utlysningarna har resulterat i 18 forskningsprojekt som berör 15 olika vetenskapliga discipliner och som engagerat 23 forskare från tio universitet och högskolor.

Två huvudkriterier ska vara uppfyllda för att en ansökan ska komma i fråga för medelstilldelning. För det första krävs att ansökan är inomvetenskapligt relevant och av god kvalitet och för det andra att den är relevant för SKB:s uppdrag. Uppfylls inte båda dessa kriterier faller ansökan. Ansökningsförfarandet sker i två steg. Vid utlysningen efterfrågas relativt kortfattade idéskisser, som behandlas av beredningsgruppen, SKB och berörda kommuner. De idéskisser som bedöms som särskilt intressanta uppmanas att komma in med fullständiga projektbeskrivningar. De projekt som godkänns går vidare till kontraktsskrivning.

Forskningsprogrammet har hittills engagerat forskare från universiteten i bland annat Lund, Göteborg, Linköping, Stockholm, Uppsala och Umeå och har en god geografisk spridning, figur 28-1. Programmet har även en god ämnesmässig bredd och omfattar till exempel discipliner som ekonomisk historia, kulturgeografi, juridik, psykologi, sociologi, medievetenskap, samhällsvetenskap och etik, se figur 28-2. De flesta projekten i programmet är tvååriga.



Figur 28-1. Geografisk spridning av samhällsforskningsprogrammet.



Figur 28-2. Ämnesmässig spridning av samhällsforskningsprogrammet.

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 populärvetenskaplig form, till exempel i SKB:s årsböcker om samhällsforskningen. Information om och resultat från samhällsforskningsprogrammet finns också på vår webbplats. Via dessa kanaler kan kommunernas politiker och tjänstemän, allmänhet, myndigheter och miljöorganisationer och forskare följa utvecklingen av projekten.

Tre forskningsseminarier har genomförts under år 2007, 2008 och 2009 i syfte att presentera resultat från den pågående forskningen. Totalt har sex tvådagarsseminarier och två halvdagsseminarier genomförts sedan programstart. Seminarierna är en viktig mötesplats där kommunföreträdare, intressegrupper och myndigheter får direktkontakt med de forskare som är aktiva inom programmet. Våren 2011 planerar SKB att genomföra ett internationellt seminarium i Stockholm.

Årliga avstämningar av programmet har genomförts sedan år 2006. Intervjuer har genomförts med representanter för kommuner, myndigheter, forskare och miljöförörelsen. Intervjupersonerna ombads bland annat att komma med synpunkter på det hittillsvarande programmet och att ge förslag på nya forskningsidéer.

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. Professor Britt-Marie Drotz Sjöberg, Norges Teknisk-naturvetenskaplige universitet i Trondheim, professor Boel Berner, Tema Teknik och social förändring, Linköpings universitet och professor Einar Holm, Kulturgeografiska institutionen, Umeå universitet. Till gruppens uppgift hör också att regelbundet följa utvecklingen av arbetet. Projekten lämnar halvårsvisa rapporter av verksamheten som kommenteras av beredningsgruppen.

En viktig uppgift för beredningsgruppen är att granska artiklarna till SKB:s årsböcker och slutrapporterna som publiceras inom programmet. Beredningsgruppens arbete innebär inte en vetenskaplig styrning av forskningen, utan syftar till att uppnå ökad klarhet och relevans i artiklar och rapporter.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

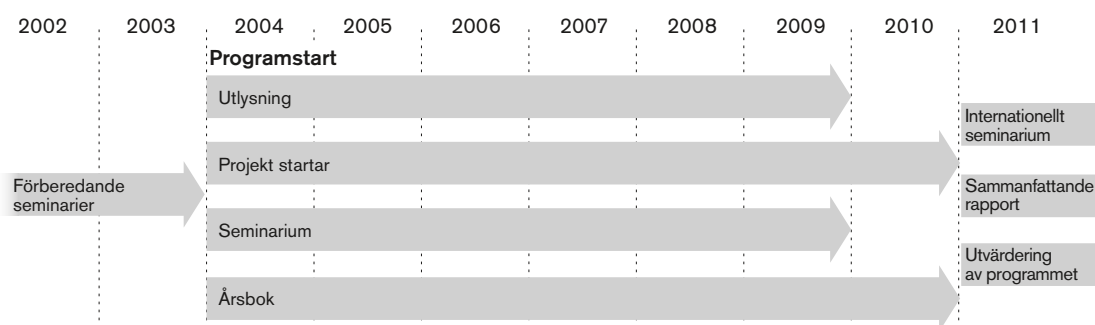
Våren 2008 och 2009 gjordes den femte och sjätte utlysningen med ledning av de synpunkter på programmet som inkommit från kommuner, myndigheter och övriga remissinstanser. Följande projekt beviljades forskningsmedel vid dessa utlysningar:

- Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet, Uppsala universitet.
- Demokratiska kärnfrågor – En studie av hur opinioner och omvärldsförändringar påverkar politiska beslutsprocesser kring slutförvaringen av kärnavfall, Mittuniversitetet.
- Kärnavfallens tidsperspektiv i jämförelse, KTH.

Nya och kompletterande frågeställningar kan komma att aktualiseras under tiden för prövningen av SKB:s tillståndsansökningar för Kärnbränsleförvaret. Det är dock SKB:s ambition att forskningsprogrammet under perioden 2004–2011 innehållsmässigt ska svara upp mot de behov som finns av att få olika samhällsaspekter belysta. En översikt av programperioden finns i figur 28-3 och en förteckning över projekten med start- respektive sluttidpunkt finns i tabell 28-1. Den återkommande dialog som skett under programmets gång har gett förutsättningar för detta.

Utvärdering av programmet

En sammanfattande rapport om den forskning som genomförts under åren 2004–2009 har tagits fram /28-10/. Den innehåller en presentation av samtliga hittillsvarande projekt och de viktigaste resultaten. Vidare förs även en diskussion kring ett antal centrala frågeställningar, som är av betydelse för förståelsen av kärnavfallsfrågans sociala och samhällseliga konsekvenser. Det är frågor som har aktualiserats av och även belysts i de olika projekten. Exempelvis samhällseliga förändringsmönster, olika bilder av Kärnbränsleförvarets nytta och risker lokalt och nationellt, opinioner och attityder på olika nivåer samt Kärnbränsleförvarets långsiktiga betydelse diskuteras också.



Figur 28-3. Översikt över SKB:s samhällsvetenskapliga program.

Tabell 28-1. Förteckning över projekt som finansierats under programperioden.

Projekt	Högskola eller Universitet	Period
Attityder till slutförvar av använt kärnbränsle	Handelshögskolan i Stockholm	2004–2006
Kärnavfallet – Från energireserv till kvittblivningsproblem	Linköpings universitet	2004–2006
Allmänhet, expertis och deliberation	Örebro universitet	2005–2006
Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner	Lunds universitet	2004–2006
Lokal utveckling och regional mobilisering kring tekniska och storskaliga projekt	Umeå universitet	2004–2006
Långsiktiga socioekonomiska effekter av stora investeringar på små och medelstora orter	Umeå universitet	2004–2006
Nationell kärnbränslepolitik i en europeisk union	Göteborgs universitet	2005–2006
Som natt och dag trots samma kärnas ursprung?	Umeå universitet	2006
Resurs eller avfall? Internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle	Kungliga tekniska högskolan	2005–2007
Etisk argumentation i slutförvarsfrågan	Handelshögskolan i Stockholm	2006–2007
Mot aktivism eller ointresse? (2 projekt)	Uppsala universitet	2006–2007
Ungdomars syn på demokrati- och teknikfrågor	Handelshögskolan i Stockholm	2006–2008
Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg – ett rättsligt perspektiv	Göteborgs universitet	2008–2009
Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan	Kungliga tekniska högskolan	2007–2009
Deltagandedemokrati och beslutslegitimitet i flernivåstyrningssystem	Umeå universitet	2007–2009
Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet?	Uppsala universitet	2009–2010
Demokratiska kärnfrågor	Mittuniversitetet	2009–2010
Kärnavfallens tidsperspektiv i jämförelse	Kungliga tekniska högskolan	2010–2011

Rapporten ger även en sammanfattande värdering av samhällsforskningsprogrammets hittillsvarande verksamhet och behov av framtida forskning och den kan också tjäna som en inspirationskälla för andra forskare. Den kommer att kompletteras med de projekt som slutförs under år 2010/2011. En engelsk version kommer också att tas fram. Efter denna komplettering, som blir en slutrapport för hela samhällsforskningsprogrammet görs en slutlig bedömning av programmets resultat. Ett viktigt tillfälle för att få till stånd även en internationell validering av programmet är vid den internationella konferens som vi planerar att genomföra våren 2011. Först därefter görs en bedömning av framtida forskningsbehov utifrån de nya förutsättningar som gäller, under och efter, tillståndsprövning och beslut.

29 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 Kärnbränsleförvaret 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 2007 och dess granskning

SKI anser att en integrerad redovisning av resultaten i kontext av tidigare forskningsresultat skulle ha gett en mer fullständig bedömning av de samhällsekonomiska konsekvenserna för en kommun. SKI anser vidare att resultaten från forskningsprojekten skulle kunna redovisats utförligare.

Enligt den rollfördelning som etablerats mellan SKB och de forskare som har engagerats i programmet är det forskarna som avgör vilka övriga forskningsarbeten av inomvetenskaplig relevans som ska integreras i de olika projekten. Resultaten finns att ta del av i de slutrapporter som tagits fram för varje projekt samt i de årsböcker som tas fram varje år. Det utrymme som finns inom ramen för Fud-programmen är dock begränsat, men en något fylligare projektredovisning kommer att göras i Fud-program 2010. SKI efterlyser även socioekonomisk forskning i ett longitudinellt tidsperspektiv. Detta är en fråga för den kommande utvärderingen av det pågående programmet.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

De utlysningar som skett under åren 2008 och 2009 har inte resulterat i några ytterligare projektansökningar inom området Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter, vilket hade varit av intresse. Det samhällsvetenskapliga programmets arbetsformer ger stor frihet till forskarna att inom de övergripande forskningsområdena själva formulera sina forskningsfrågor och att arbeta självständigt i förhållande till finansören. Av detta följer att SKB som finansör måste acceptera forskarsamhällets prioriteringar i detta fall.

30 Beslutsprocesser

Lokaliseringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kontroversiell fråga, bland annat därför 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 och nya perspektiv för bland annat beslutsfattare att väga in i sina beslutsunderlag. Hur beslutsprocessen kring en slutförvarsetablering faktiskt ser ut är en sak och hur den uppfattas är delvis en annan. Det finns både svenska och utländska beslutsprocesser att dra lärdom av, till exempel i vad mån fattade beslut uppfattas som legitima, rättvisa och effektiva.

Slutsatser i Fud och dess granskning

SKI anser att studierna om beslutsprocesser är ett viktigt bidrag och värdesätter i synnerhet forskningen om arbetet i andra länder. Vidare anser SKI att studierna inte till fullo reflekterar områdets komplexitet av till exempel beslutsprocesser på olika administrativa nivåer och frågan om beslutsprocesser i ett längre tidsperspektiv. En starkare förankring och återkoppling till huvudparterna i processen, i synnerhet kommunerna, är önskvärd.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

En rad olika initiativ för att återföra kunskap och resultat till berörda parter har tagits. Initiativen har gett politiker och tjänstemän i berörda kommuner och övriga intressenter möjlighet att ta del av resultat från forskningsprogrammet. I forskningsuppgiften ingår att kommunicera resultat till olika målgrupper vid årliga tvådagarsseminarier och att, förutom den vetenskapliga publiceringen, även publicera sina forskningsresultat i populärvetenskaplig form, till exempel i SKB:s årsböcker om samhällsforskningen. Information om och resultat från samhällsforskningsprogrammet sprids också på SKB:s webbplats. Vid de årliga seminarierna skapas kontakter mellan representanterna för kommunerna och forskarna i gemensamma diskussioner, som ger tillfälle för kommunerna att bjuda in de forskare som de bedömer vara intressanta. På så sätt har både förankring och återkoppling skett till andra parter under arbetets gång.

De projekt som genomförts svarar väl upp mot SKI:s krav, att ytterligare få belyst frågor om beslutsprocesser på olika politiska och administrativa nivåer och beslutsprocesser utanför Sverige.

Resurs eller avfall? Internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle, KTH

Att förvara högaktivt kärnavfall i berggrunden är internationellt inte det enda alternativ som diskuteras. Olika länder har haft olika synsätt och förslag på lösningar. Andra alternativ som är och har varit aktuella är uppberedning av det använda kärnbränslet och kvittblivning genom export. Projektet Resurs eller avfall? Internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle, syftar till att klarlägga och analysera beslutsprocesser i ett internationellt och historiskt perspektiv /30-1/. Fokus är på fyra länder: Finland, Tyskland, Ryssland/Sovjetunionen och Japan. Att förstå vilka krafter och överväganden som avgjort vilka strategier som valts kan ge en bättre förståelse för det internationella samarbetet inom kärnkrafts- och kärnavfallsområdet.

Historien har präglats av tvära kast, osäkerhet och kontinuitet. För att analysera varför olika länder valt det ena eller andra alternativet och hur strategin förändrats över tid, fokuserar projektet på åtta centrala dimensioner.

- Producerar landet kärnvapen?
- Har landet en expansiv eller stagnerande kärnkraftssektor?
- Har landet stark eller svag teknisk kompetens på kärnenergiområdet?
- Har landet en stark eller svag antikärnkraftsrörelse?
- Är landet en demokrati eller diktatur?
- Präglas landets politik av stark eller svag lokal politiskt makt?

- Har landet goda geologiska förutsättningar för slutförvaring?
- I vilken utsträckning har landet tillgång till inhemska urantillgångar?

Dessa faktorer påverkar alla hur olika länder hanterat använt kärnbränsle, vilka konflikter som funnits och vilka val som gjorts. De ger en bild av mycket dynamiska processer, där geologiska och tekniska förutsättningar, liksom tillgången på egna uranresurser varit viktiga men där också politiken haft en central betydelse. Exempel på politikens inflytande är frånvaron av en demokratisk diskussion i Ryssland, närvaron av politisk konsensus i Finland och starka politiska motsättningar och lokala ifrågasättanden i Tyskland respektive Japan. Antikärnkraftrörelsen har ifrågasatt lämpligheten av de saltformationer som varit aktuella för ett slutförvar och krävt att flera alternativ undersöks. Geologin har därigenom blivit en faktor som även den har kommit att påverka de politiska processerna i Tyskland.

Inhemska tillgång till uran har historiskt spelat en mycket stor roll för olika länders strategiska val när det gäller hanteringen av använt kärnbränsle. I Japan, som saknar större inhemska urantillgångar, har rädslan för brist på uran påverkat de politiska besluten och bidragit till en satsning på uppbyggnadsteknik och blyreaktorer. Ett liknande tänkande kan urskiljas i Sovjetunionens tidiga kärnkraftshistoria, även om det senare blivit tydligt att urantillgångarna är goda. I Finland och Tyskland innebär den nuvarande satsningen på direktdeponering av det använda kärnbränslet implicit, att man litar på att urantillgången i framtiden inte blir ett problem. Förekomsten av skandaler, politiska kontroverser, och starka antikärnkraftrörelser har, särskilt i Tyskland och Japan, medverkat till att länderna mer eller mindre hamnat i en återvändsgränd.

Frånvaron av opposition har i Ryssland – och tidigare i Sovjetunionen – gjort att inriktningen på uppbyggnad fortsatt, om än med stora ekonomiska och tekniska frågetecken, medan den demokratiska konsensus som utvecklats i Finland har lett till beslut om val av plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle.

Grunden för beslut i kärnavfallsfrågan, upplevelser av lagstiftningsgrund och MKB-process, Umeå universitet

Projektet Grunden för beslut i kärnavfallsfrågan, upplevelser av lagstiftningsgrund och MKB-process, syftar till att analysera flernivåstyrningsprocessen i samband med lokalisering och utformning av slutförvar för använt kärnbränsle /30-2/. Eftersom det inte finns några liknande anläggningar uppförda i Sverige, finns det inte heller någon utarbetad praxis för hur lagar ska samordnas och tolkas. Studien belyser tre övergripande frågeställningar:

1. Vilket är det formella beslutsmandatet och vilka är beslutsinstanserna på olika nivåer – lokalt, regionalt och nationellt – enligt gällande lagstiftning? Vilka olika tolkningsfrågor görs av de olika aktörerna?
2. Vilken allmänhet och vilka organisationer har, förutom de som har ett formellt beslutsmandat, deltagit i MKB-samråd, och vilka synpunkter har de haft på processen?
3. Hur har bedömningar av och reaktioner på risk relaterat till ett slutförvar hanterats i processen?

Studien baseras huvudsakligen på två olika typer av material. En litteraturstudie med fokus på kärnbränslehantering är genomförd inom det samhällsvetenskapliga fältet. Särskilt intresse ägnas åt innehållet i lagstiftningen ställt i relation till MKB-processen, dess bakgrund och utformning. MKB-processen är av särskilt intresse eftersom den involverar både formella beslutsinstanser och intressegrupper. Vidare behandlar litteraturstudien teoretiska perspektiv gällande uppfattningar och kommunicerandet av riskbedömningar.

Litteraturstudierna innefattar också protokoll från SKB:s samråd under perioden 2001 till 2007 samt två intervjustudier med delvis olika inriktning. Den första intervjustudien syftar till att undersöka hur deltagare med en formell roll i samråden upplever lagstiftning, MKB-förfarandet och tillståndsprocesser. Fjorton intervjuer genomfördes med representanter för kommuner (politiker och tjänstemän med juridisk kompetens i kärnavfallsfrågan), länsstyrelser, SKB, SSI, SKI, regionala miljödomstolar och miljödepartementet. Den andra intervjustudien handlar om de samråd som genomförts under MKB-processen. Totalt 20 intervjuer genomfördes med de olika parter som deltagit vid samråden.

Intervjuerna visar att den kommunala nivån och lokala miljöorganisationer har en aktiv roll, medan den regionala nivån via länsstyrelserna inte är lika aktiva. På den nationella nivån uppmärksammas framför allt statens inverkan på MKB-processen, genom bland annat besluten om finansiellt stöd via Kärnavfallsfonden, till olika intressegruppers deltagande. En genomgående uppfattning är att de flesta aktörerna upplever att den egna rollen är tydlig, men att samspelet mellan sektorslagar och miljöbalken till vissa delar är otydligt.

Miljöorganisationerna och övriga parter har till stor del haft olika perspektiv på samrådets roll. Mer etablerade parter, inklusive myndigheterna, företräder ett planeringsparadigm där själva projektet och de politiska besluten ställs i fokus. Miljöorganisationerna representerar traditionellt ett miljöparadigm som fokuserar på försiktighetsprincipen för potentiellt miljöfarliga verksamheter. Dessa skillnader har varit genomgående under samrådsprocessen.

Resultaten från intervjuerna visar också att miljöorganisationerna och allmänheten inte kan delta i samrådsprocessen på samma villkor som myndigheter och industri. Industrins resurser kan inte matchas av någon annan part, vad gäller expertkunnande och information. Vissa anser att länsstyrelsen borde ha en mer central roll, givet dess övergripande ansvar för koordination. Med undantag för miljöorganisationerna råder stor enighet om att industrin, som också föreskrivs i svensk lag, ska ha ansvaret för MKB-processen.

När det gäller skillnader i riskperception mellan olika aktörer, visar studien att aktörer med en expertroll tenderar att betona låga risker och möjligheter till god riskkontroll. Lekmän lyfter å sin sida fram de risker som finns för människor och miljö. Vidare pekar studien på, att det inte går att betrakta lekmän som en homogen grupp. Intervjuerna belyser tydliga skillnader mellan exempelvis närboende och miljöorganisationerna. Närboende talar ofta om risker kopplade till konsekvenser för deras närområde på kort sikt, medan miljöorganisationerna i stället fokuserar på långsiktiga risker för miljön.

Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet, Uppsala universitet

SKB ägs av kärnkraftsägarna och ansvarar för omhändertagandet av kärnavfallet som uppkommer i Sverige, inklusive ett slutförvar för använt kärnbränsle. Frågor om ägande, styrning, förhållande till omgivande intressenter och lokalsamhället är ständigt närvarande. Oavsett vilken plats som väljs kommer Kärnbränsleförvaret att bli ett stort industriellt projekt. Projektet kommer att föra med sig en industriell och organisatorisk problematik av det slag näringslivet i övrigt möter. Samtidigt rymmer slutförvarsprojektet vissa unika inslag som gör det till ett särfall. Till exempel sträcker sig organiseringen över en lång tidshorisont och den omgärdas av mycket strikta legala krav.

På grund av att diskussionen framför allt har handlat om säkerhet och val av plats, har uppförandet av slutförvarsanläggningen och dess industriella dimensioner hamnat i skymundan. Detta har också gjort att de frågor som normalt brukar ställas till näringslivets aktörer kring organisation, styrprinciper och socialt ansvarstagande inte har ställts. Denna studie tar upp dessa frågeställningar genom att granska Kärnbränsleförvaret som industriellt projekt och undersöka vilka specifika organiserings- och företagsstyrningsproblem som projektet kommer att föra med sig.

De forskningsfrågor som studien avser att besvara är:

- Hur kommer SKB, mot bakgrund av sitt legala ansvar för kärnavfallet, organisera den industriella aspekten – bygge, drift och förslutning – av slutförvaret över tid?
- Vilka är orsakerna till och konsekvenserna av dessa organisatoriska vägval?
- Vilka problem och möjligheter skapar de organisatoriska vägvalen i förhållande till centrala intressenters förväntningar på slutförvarsprojektet?

Forskningsprojektet kommer inte i första hand att studera företaget SKB, utan fokusera på de industriella enheternas organisering inom själva slutförvarssystemet. Projektet berör inte heller de socioekonomiska förhållandena i berörda kommuner. Dess relevans ligger snarare i att det visar hur organisatoriska vägval får konsekvenser för olika intressenter i slutförvarsfrågan och att det kan tydliggöra möjliga roller och ansvar i den fortsatta processen. Även frågan om förutsättningarna för att organisera ett anläggningsprojekt med mycket lång tidshorisont studeras. Projektet slutrapporteras hösten 2010.

31 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 Kärnbränsleförvar 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 betydelsefullt att belysa ”symboliken” kring Kärnbränsleförvaret och dess verksamhet.

Slutsatser i Fud 2007 och dess granskning

SKI anser att de resultat som framkommit är ytterst relevanta och motiverar ytterligare forskningsinsatser.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Tre nya projekt har genomförts inom forskningsområdet. Ett av projekten består av två delstudier som har rapporterats var för sig.

Mot aktivism eller ointresse? Svenska ungdomars syn på demokrati och teknologi i ett internationellt och longitudinellt perspektiv, Uppsala universitet och Högskolan i Halmstad

Projektet Mot aktivism eller ointresse? Svenska ungdomars syn på demokrati och teknologi i ett internationellt och longitudinellt perspektiv innefattar två delstudier, en internationell tvärsnittsstudie /31-1/ och en svensk longitudinell studie /31-2/. En utgångspunkt för projektet är tanken att inställningen nu och i framtiden till ett slutförvar för använt kärnbränsle, till besluten om dess tillblivelse och lokalisering liksom dess långsiktiga legitimitet, inte bara kan ses som en separat, isolerad attityd här och nu. Snarare ingår en persons uppfattning om en sådan specifik fråga i en kontext av attityder till andra företeelser, som i sin tur även formas av mer grundläggande föreställningar om värden, risker och beslutssystem. Exempelvis kan ett Kärnbränsleförvar vara relaterat till den vidare frågan om inställningen till kärnkraft. Projektet fokuseras mot ungdomar, de ska leva länge med resultatet och de bär också med sig något av sin tidigt erhållna inställning genom livet.

Projektet analyserar hur några inslag i denna väv av inställningar och drivkrafter hänger ihop och utvecklas. I den longitudinella studien ställs frågan om hur synen på kärnkraft, andra teknologier, teknik och vetenskap generellt och demokrati bland ungdomar förändrats under de senaste årtiondena i Sverige. Vilken roll spelar ålder jämfört med födelseår för förändringarna i attityderna till teknik, främst kärnkraftens användning, och demokratin sedan 1980-talet? Vilka processer har förändrat synen på teknik och demokrati bland ungdomar under denna tid?

Den svenska longitudinella studien tyder på att ungdomarnas systemkritik har klingat av sedan 1960- och 1970-talen, både när det gäller kärnkraft och hur det politiska systemet fungerar. Det är främst 1940- och 1950-talisterna som har ändrat inställning och blivit allt mindre kritiska till kärnkraften och det politiska systemet som sådant. Attityder till kärnkraft förklaras bättre av ålder än av födelseår, medan det motsatta gäller för attityder till demokratin.

Slutsatsen i den svenska longitudinella studien är alltså att unga inte skiljer sig särskilt mycket från äldre beträffande synen på demokratin. Den internationella tvärsnittsstudien ger samma resultat. Däremot tyder det svenska materialet på att de unga skiljer sig från de äldre genom att direkt ta till sig nya tekniker. Dessa nya tekniker, som lett till ett drastiskt förändrat beteende och system för kommunikation under de senaste decennierna, tycks även på lång sikt ha bidragit till den ökade acceptansen av nya tekniker för energiproduktion. Den internationella tvärsnittsstudien kombinerar

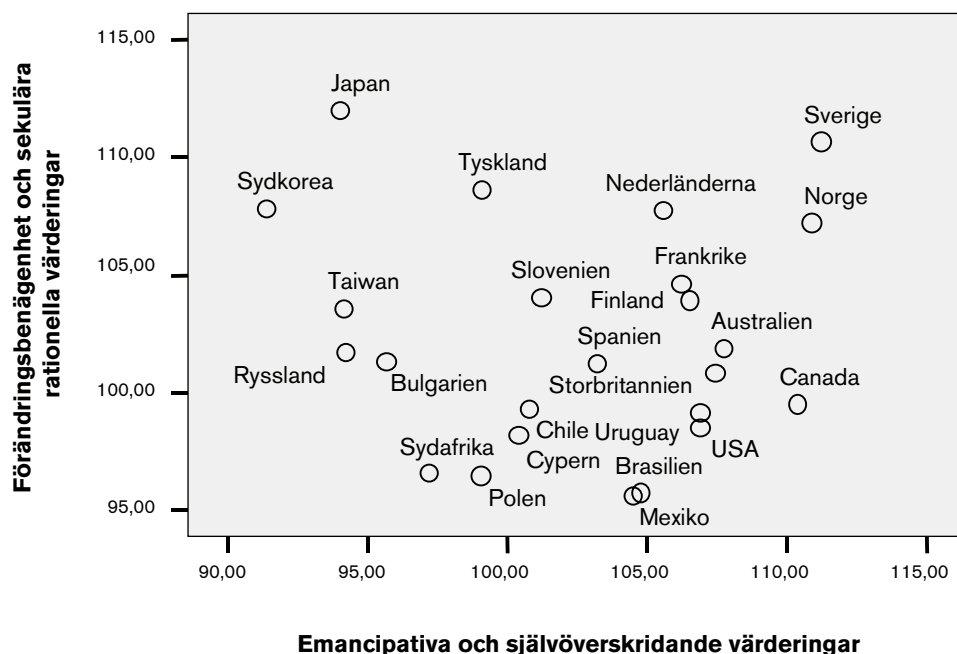
fyra perspektiv på hur ungdomar förhåller sig till demokrati och politik genom att (1) sätta in dem i ett dynamiskt förändringsperspektiv, (2) se dem som formade av den svenska politiska kulturen, (3) jämföra dem med deras äldre landsmän och sedan (4) analysera deras syn på demokrati och politik som ett uttryck för grundläggande värderingar.

Analyserna inriktas främst mot dem som i projektet definieras som "blivande vuxna". Dessa är mellan 18 och 27 år och uppfyller högst ett av kriterierna att vara gift, att ha barn eller att ha heltidsarbete. Detta är en relativt ny utvecklingsålder, som inträffar mellan den egentliga ungdomstiden och vuxenåldern. Analysen visar på två centrala värde dimensioner: "emancipativa och självöverskridande värderingar" respektive "förändringsbenägenhet och sekulära värderingar".

De självöverskridande utmärks bland annat av en positiv syn på det gemensamma bästa, aktiv medverkan i civilsamhället, tolerans för sociala minoriteter samt att individuell autonomi är viktigare än ekonomisk utveckling och lag och ordning. Förändringsbenägenheten utmärks av att man värdesätter kreativitet, frihet och spänning framför att bevara det befintliga i form av traditionella auktoriteter som religion och familj. Sverige visar sig vara ett särfall med höga värden i båda dessa dimensioner. I alla länder, inklusive Sverige, ligger de blivande vuxna högre när det gäller både förändringsbenägenhet och sekulära värderingar.

När det däremot gäller de emancipativa och självöverskridande värderingarna visar de vuxna i många länder högre värden än de blivande vuxna. Sverige är dock ett undantag i detta hänseende. Ett genomgående resultat för de 24 länder som studerats är, att skillnaderna mellan de blivande vuxna och de övriga vuxna är mindre än skillnaderna mellan länderna, se figur 31-1. Svenskarna har en jämförelsevis mycket positiv syn på demokrati och politik, och avståndet mellan de svenska blivande vuxna och de övriga vuxna är mindre än i andra länder. De blivande vuxna följer i spåren efter de vuxnas uppfattningar om demokrati och politik. Man behöver därför inte vara pessimistisk om att de svenska ungdomarna ska leda utvecklingen bort från den svenska politiska traditionen.

Analysen visar också att synen på demokrati och medborgarskap har förändrats i riktning mot en mer individorienterad syn, från ett samhällscentrerat demokratibegrepp till ett individorienterat, från en undersåtlig och/eller solidarisk syn på medborgarskapet till ett mer aktivistiskt förhållningssätt. Denna förändring är mest tydlig för Sveriges del.



Figur 31-1. Medelvärden för två grundläggande värderingsdimensioner i 24 länder /31-1/.

I en avslutande del av projektet analyseras frågan om svenska ungdomars olika inställning till demokrati respektive vetenskap/teknik är specifikt svensk. Skiljer den sig från unga människors inställning i andra länder? Analysen visar bland annat att Sverige har det högsta värdet av alla undersökta länder för den prodemokratiska inställningen, både bland vuxna och blivande vuxna, efter Norge och Tyskland. Bulgarien och Brasilien är de länder som visar de lägsta värdena.

När det däremot gäller positiv syn på vetenskap och teknik ligger Bulgarien, Polen och Sydafrika högst och Japan, Slovenien och Uruguay lägst. Sverige visar medelhöga värden och kommer på sjunde plats, strax efter USA men före Kanada. Förhoppningarna på vetenskap och teknik tycks vara störst i de länder som ligger senare i införlivandet av detta.

De svenska ungdomarna är lika positiva till ett demokratiskt styrelseskick som sina äldre landsmän. När det däremot gäller inställningen till vetenskap och teknik uppvisade både yngre och äldre svenskar genomsnittliga och förväntade värden. Svaret på huvudfrågan för denna avslutande analys blir, att svenska blivande vuxna liknar de vuxna i andra länder, genom att ha en likartad restriktiv syn på vetenskap och teknik. Däremot är de betydligt mer prodemokratiska och alltså även i den frågan mer lika de vuxna i landet. Detta skiljer de svenska ungdomarna från andra länders ungdomar.

Etisk argumentation i slutförvarsfrågan, Handelshögskolan i Stockholm

Projektet Etisk argumentation i slutförvarsfrågan analyserar de etiska värderingsskillnader som finns i frågan om ett slutförvar för använt kärnbränsle /31-3/. Tanken är att etiska värderingar kommer till uttryck i argumentationen och kan identifieras genom att studera olika aktörers debatt- och diskussionsinlägg. Värderingarna kan i sin tur antas ha betydelse för vilka beslut som tas. Motstridiga värderingar kan ligga till grund för en del svårhanterliga etiska meningsskiljaktigheter. Samtidigt kan likhet i värderingar mellan olika aktörer medföra att viktiga frågor, där det finns en etisk samsyn, inte kommer upp till diskussion. Syftet är att bidra till ökad förståelse av de etiska värderingsskillnader som finns i slutförvarsfrågan. Analysen utgår från ett antal frågeställningar. Vilka argumenterar offentligt i slutförvarsfrågan? Vilka sakområden diskuteras? Hur ser aktörernas argumentation ut och utifrån vilka etiska värderingar sker argumentationen?

Svaret på frågan om vilka som argumenterar i den offentliga diskussionen i slutförvarsfrågan blir med studiens urvalsprinciper primärt ett antal miljöorganisationer, huvudsakligen MKG (Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning), Milkas (Miljörelsens kärnavfallssekreteriat) och Oss (Opinionsgruppen för säker slutförvaring). Andra deltagare till exempel Kärnavfallsrådet, SKB, berörda kommuner, regionförbund, länsstyrelser och SSM som alla, jämfört med miljöorganisationerna är mer sparsamma med argumenterande texter.

Det som diskuteras är framför allt tre sakområden. Vilken plats ska väljas? Vilken metod är tillräckligt säker? Hur ska beslutsprocessen se ut? När det gäller platsvalet har fokuseringen på Östhammars och Oskarshamns kommuner som huvudsakliga platsalternativ för ett svenskt slutförvar mött kritik, framför allt ifrån ett antal miljöorganisationer. Deras tes är att alternativa lokaliseringar av ett Kärnbränsleförvar bör utredas mer. Milkas menar till exempel att SKB "inte väljer kommun utifrån var det skulle fungera bäst tekniskt, utan utifrån var kärnavfallsförvaringen accepteras politiskt av kommunledningen och allmänheten". SKB, liksom Kärnavfallsrådet, menar att frågan är flerdimensionell och att ett begrepp som "bästa möjliga plats" saknar mening om det inte definieras i vilket avseende platsen är "bäst" och under vilka förutsättningar begreppet ska tillämpas.

Att använda politisk och opinionsmässig acceptans lokalt som ett kriterium för platsvalet, skapar också konflikter. SKB hävdar att politiskt och opinionsmässigt stöd är en förutsättning för att Kärnbränsleförvaret över huvud taget ska kunna anläggas, medan vissa miljöorganisationer menar att det över huvud taget inte bör beaktas som ett platsvalskriterium. Även när det gäller metodvalet finns divergerande åsikter där 2001 års regeringsuttalande, om KBS-3-metoden som planeringsförutsättning för SKB:s platsundersökningar, gett denna metod en särställning. Särskilt bland miljöorganisationerna finns en skepsis mot metoden och att alternativ som deponering i djupa borrhål inte ges en mer framträdande roll. I frågan om återtagbarhet finns också vitt skilda uppfattningar. Det som skiljer aktörerna åt är om återtagbarhet är förenligt med långsiktig säkerhet och om återtagbarhet är en förutsättning för kommande generationers handlingsfrihet. Även beslutsprocessen och ansvarsfördelningen mellan olika aktörer i processen kritiserar, framför allt av miljöorganisationerna. De menar att beslutsprocessen har stora brister ur demokratisk synvinkel.

Baserat på de argument som förekommer grupperar studien aktörerna i fyra olika grupper.

1. Processdrivare (SKB).
2. Observatörer (myndigheter, kommuner, länsstyrelser, Kärnavfallsrådet).
3. Processkritiker (MKG, Oss, Avfallskedjan).
4. Kärnkraftsmotståndare (Milkas, Greenpeace).

Meningsskiljaktigheterna är stora mellan dessa olika aktörer. Projektet konstaterar att de olika aktörerna, trots att de står långt ifrån varandra i diskussionen, delar flera viktiga etiska värderingar. Detta gäller framför allt principen att inte skada, föreställningen om rättvisa mellan generationerna, producentansvarsprincipen och principen om medbestämmande. Projektet identifierar också att det finns en stor underliggande tvistefråga, som gäller relevansen av så kallade funktionella värderingar i förhållande till etiska värderingar. Det handlar om att det finns olika synsätt på relevansen av processeffektivitet i fråga om tid, ekonomi och allmänna socioekonomiska effekter i slutförvarsfrågan.

Avslutningsvis diskuteras om att det kan finnas en risk att slutförvarsfrågan och kärnkraftsdiskussionen skapar en alltför snäv och symbolladdad ram för den publika argumentationen. Kärnavfallet diskuteras livligt och stundtals infekterat, i relativ isolering från andra viktiga miljöetiska frågor. Detta kan anföra både mot kärnkraftsindustrin, som fokuserar på avfallet som ett lösbart problem och mot de starkt kritiska miljöorganisationerna, som gör avfallet till sin huvudfråga. Kan frågan om kärnkraften och det avfallsproblem den för med sig över huvud taget diskuteras utan koppling till för- och nackdelar med andra energikällor och miljöproblem, resursanvändning och välfärdsprioriteringar i stort?

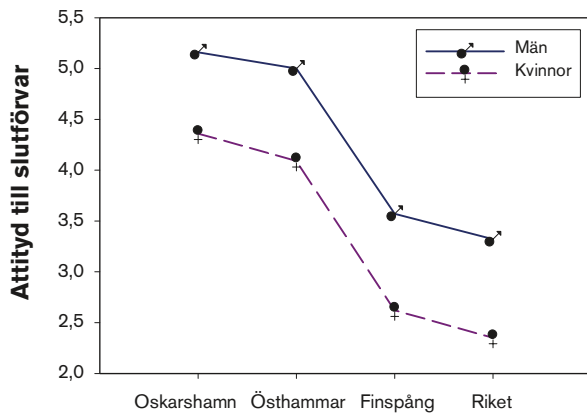
Attityder till slutförvar av använt kärnbränsle – struktur och orsaker, Handelshögskolan i Stockholm

Det övergripande syftet med projektet Attityder till slutförvar av använt kärnbränsle – Struktur och orsaker, är att undersöka attitydernas struktur och orsaker vad gäller slutförvar för använt kärnbränsle /31-4/. Tidigare forskningsresultat visar på skillnader mellan ungdomar och äldre, mellan män och kvinnor och mellan platsundersökningskommunerna Oskarshamn och Östhammar, samt mellan dessa kommuner och landet i övrigt. Projektet är inriktat på att förklara skillnaderna i attityd till ett slutförvar mellan olika åldrar och kön, men också på att gå djupare in på frågan om skillnaden mellan orter. Ett underordnat syfte är att mer noggrant studera attityden till kärnkraft, eftersom den tidigare visat sig vara av stor betydelse för att förstå inställningen till ett slutförvar. Det finns en mer positiv inställning till ett slutförvar i platsvalskommunerna och risken med kärnavfall bedöms där som liten. I Oskarshamn och Östhammar finns en klar majoritet bland männen för ett slutförvar, medan en viss tveksamhet finns bland kvinnorna, se figur 31-2.

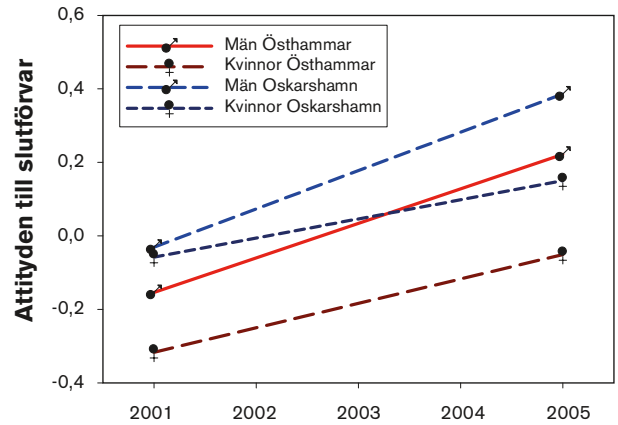
Tidigare datamaterial har visat att attityden till ett slutförvar blivit mer positiv i Oskarshamn och Östhammar under perioden 2001–2005, se figur 31-3. Dessa skillnader kan bara till en liten del förklaras av att många har kärntekniskt arbete. I en analys av platsvalskommuner och övriga riket, är den viktigaste förklaringen till skillnaderna den nytta man anser att en sådan anläggning har för kommunen. Ytterligare viktiga förklaringsfaktorer är tillit till vetenskapen (epistemiskt förtroende), emotionella reaktioner, attityd till kärnkraft och bedömning av risker.

Det finns små skillnader mellan unga och äldre, där de äldre är mer positiva i både platsundersökningskommunerna och i landet i stort. Ålderseffekten är större bland kvinnor än bland män, och män är generellt sett mer positiva än kvinnor till ett slutförvar. Det finns en interaktion mellan kön och bostadsort, som visar att könsskillnaden är mindre i Oskarshamn och Östhammar än i resten av landet, se figur 31-4 och 31-5.

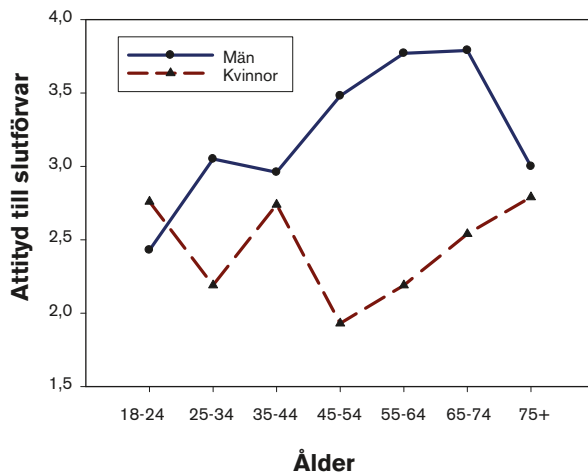
När det gäller SKB:s föreslagna metod, KBS-3, är befolkningen i Oskarshamn och Östhammar mest nöjda, medan respondenterna i övriga landet oftare vill se en utveckling av andra metoder. Unga i Oskarshamn är mer positiva till SKB:s metod än unga i Östhammar. Vidare är kvinnor mindre positiva till metoden än vad männen är. Det finns ett samband mellan partipolitiska preferenser och inställningen till ett slutförvar. Inställningen till kärnkraft visar att det finns en ganska positiv attityd till det svenska kärnkraftsprogrammet. Upplevd nytta är här den viktigaste komponenten, se figur 31-6. Det finns dock en viss oro och attityden i Oskarshamn och Östhammar har blivit mindre positiv sedan år 2005.



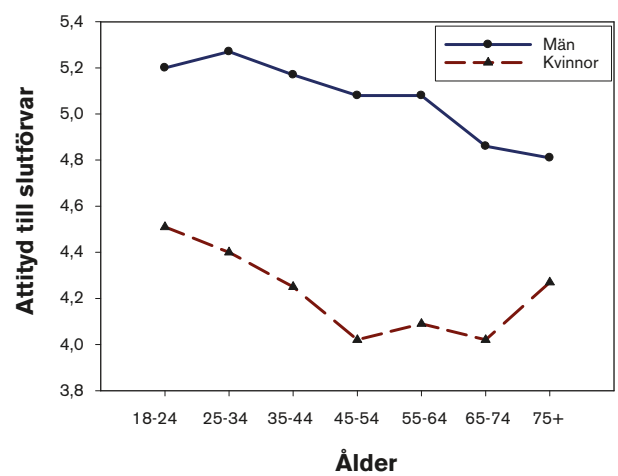
Figur 31-2. Attityden till ett slutförvar i den egna kommunen.



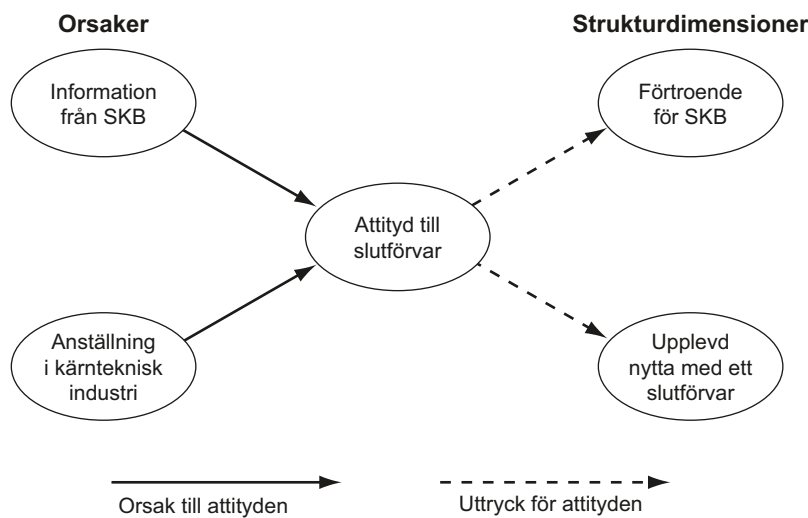
Figur 31-3. Attityd till slutförvar 2001–2005. Standardiserad skala.



Figur 31-4. Attityd som en funktion av ålder, data från hela landet.



Figur 31-5. Attityd som en funktion av ålder, sammanlagda data från Oskarshamn och Östhammar.



Figur 31-6. Exempel på kausal- och strukturdimensioner i förhållande till attityden till ett slutförvar.

Tjugo olika typer av handlingar bedöms i undersökningen och de svarande ombads bland annat att ange i vilken grad de, ”deltagit i informationsträff anordnad av SKB” och ”talat med anhöriga, vänner eller bekanta om denna fråga”. Svaren kombinerades till ett index för att mäta handlingsbenägenhet och studien visar dels att flertalet respondenter inte varit så aktiva, dels att de som rapporterade mera extrema attityder också uppgav en större handlingsbenägenhet. Detta innebär att de som hade de starkaste positiva eller negativa attityderna också är de som är mest aktiva. Studien visar att om man vänder sig till särskilt engagerade personer i en fråga, som den som rör slutförvaret, kommer man därför i kontakt med personer som har ovanligt utpräglade attityder.

De särskilt intressanta resultaten i undersökningen bygger på två serier av frågor som handlar om information. 1. Varifrån man fått information? 2. Tog denna information tog upp det som var viktigt? Frågorna gäller information från SKB, myndigheter, opinionsgrupper och information från den egna kommunen. Resultaten visar att särskilt information från SKB tycks ha haft stor effekt på attityden i alla grupper i en positiv riktning, och att särskilt boende i platsundersökningskommunerna har fått, eller skaffat sig, sådan information. Liknande effekter, men svagare, framträder för information från myndigheter och från kommunerna. Information från opinionsgrupper tycks ha nått få personer, men haft en viss effekt på attityden till ett slutförvar främst i Östhammar.

När det gällde bedömningar av kvaliteten på informationen, det vill säga om informationen tar upp det som är viktigt, så uppfattas kvaliteten som hög när den kommer från SKB, något lägre om den kommer från myndigheter och den egna kommunen. Information från opinionsgrupper uppfattas mindre positivt i Oskarshamn och Östhammar, men mer positivt i övriga landet. Studien finner att informationen har nått de äldre i något större utsträckning än de yngre, samt män något mera än kvinnor.

Attityden till ett slutförvar för använt kärnbränsle kan förklaras på basis av uppfattningar om slutförvarets risk och nytta, epistemiskt och socialt förtroende, samt vad de svarande tror är andras uppfattningar. I en modell där dessa variabler betraktas som strukturfaktorer, det vill säga som konsekvenser av attityden och inte som dess orsaker, har uppnåtts en hög förklaringsprocent (86 procent av variationen i attityden). Framför allt är den uppfattade nyttan en stark förklaringsfaktor. Separata modellenpassningar för män och kvinnor, unga och äldre och för boende på olika orter ger likartade resultat.

Sammanfattningsvis redovisar studien att det finns en tendens till att de äldre har en mera positiv attityd till ett slutförvar, än de yngre. Denna tendens kan förklaras av att de yngre är mera negativa till kärnkraft och mindre intresserade av avfallsfrågan. När det gäller inställningen till kärnkraft, går attityden i en annan riktning än vad inställningen till teknik i allmänhet gör. De yngre är mer positiva till teknik i de flesta fallen, men inte när det gäller kärnkraften. Män och kvinnor skiljer sig åt i betydande utsträckning när det gäller attityden till ett slutförvar. Även i detta fall är attityden till kärnkraft en viktig förklarande faktor, men på andra plats kommer oro och inte intresse, som i fallet med åldersvariationen. Kvinnor känner större oro i de flesta avseenden, men skillnaden är särskilt stor när det gäller kärnteknik. Speciellt de yngre kvinnorna har en negativ (eller lite positiv) attityd till kärnkraft. Detta kan bidra till att de yngre som grupp är mindre positiva till ett slutförvar än vad de äldre är.

Demokratiska kärnfrågor. En studie av hur opinioner och omvärldsförändringar påverkar beslutsprocesser kring slutförvaring av använt kärnbränsle, Mittuniversitetet, Sundsvall

Projektet Demokratiska kärnfrågor. En studie av hur opinioner och omvärldsförändringar påverkar beslutsprocesser kring slutförvaring av använt kärnbränsle, som har påbörjats inom forskningsområdet Opinioner och attityder har också tydliga kopplingar till området Beslutsprocesser och området Omvärldsförändringar. Frågan om slutförvaringen av kärnavfallet från de svenska kärnkraftverken är av flera skäl demokratiskt intressant att analysera. För det första rymmer hela kärnkraftsfrågan ideologiska, men också delvis blocköverskridande partipolitiska konfliktmönster, som inte minst blev tydliga i samband med den svenska kärnkraftsomröstningen år 1980. Där var Centern och Vänsterpartiet för en avveckling, medan övriga partier förordade två olika linjer med bibehållen kärnkraftsproduktion. För det andra tangerar kärnavfallsfrågan grundläggande ställningstaganden mellan frågor som rör det ekologiska samhällets krav på miljöhänsyn och hållbar utveckling å ena sidan, och industrisamhällets krav på tillförlitlig energiförsörjning och ekonomisk

utveckling för att garantera välfärden å den andra sidan. För det tredje rymmer frågan om den rent geografiska placeringen av Kärnbränsleförvaret också möjliga spänningar mellan centrala och lokala maktcentra och olika intresser på dessa nivåer.

I samtliga dessa tre ovan redovisade konfliktdimensioner – den ideologisk-politiska, den ekologisk-ekonomiska och den centrala-lokala – finns för närvarande osäkerhetsmoment om den framtida utvecklingen av kärnkraften och kärnavfallens slutförvaring. När det gäller den senare frågan kan flera osäkerhetsfaktorer noteras: Hur kan det politiska beslutsfattandet och det politiska manöverutrymmet före beslut om slutförvaringen, komma att påverkas av förändringar i det rådande opinionsklimatet? Hur kan det politiska beslutsfattandet komma att påverkas av förändrade omvärldsfaktorer vad gäller synen på miljöhot, hållbar utveckling, teknikutveckling, rättsliga frågor och ekonomisk tillväxt? Och slutligen, hur kan de möjliga förändringarna av opinionsklimat och omvärldsfaktorer komma att påverka avvägningar mellan nationella och lokala perspektiv i kärnavfallsfrågan?

Syftet med projektet är att belysa villkoren för det politiska beslutsfattandet i Sverige, när det gäller ett slutförvar för använt kärnbränsle med hänsyn tagen till förändringar i opinionsklimat och omvärldshändelser. Till skillnad från studier av allmän opinionsutveckling och påverkan på den allmänna opinionen av till exempel politiska partier och media, är syftet i den här studien att analysera hur den politiska dagordningen byggs upp i ett komplext samspel mellan politiska partier, intresseorganisationer, myndigheter, näringsliv och media. De kan alla antas vara aktörer med egna intressen och rationella motiv, men också mottagliga för förändringar i opinion och omvärld. Resultatet av detta forfarande av en politisk dagordning, kan också antas utgöra en grund för vilka beslut som är möjliga att fatta i en politisk fråga.

Följande frågeställningar är centrala för studien:

- Vad karakteriserar den parlamentariska och partipolitiska debatten i kärnavfallsfrågan och på vilket sätt har aktörer, ståndpunkter och argument förändrats över tid?
- Vad karakteriserar medias opinionsbildning och nyhetsförmedling i kärnavfallsfrågan och på vilket sätt har aktörer, ståndpunkter och argument förändrats över tid?
- På vilka sätt relaterar den politiska dagordningen och mediala dagordningen till varandra, när det gäller frågan om det svenska kärnavfallet?

Projektet kommer att slutrapporteras hösten 2010.

32 Omvärldsförändringar

Etableringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle är ett unikt projekt med speciella kännetecken. Till slut är det bara en ort i Sverige som blir aktuell. SKB valde år 2009 Forsmark i Östhammars kommun som plats för Kärnbränsleförvaret. 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 slutförvarsanläggningen. 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 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 2007 och dess granskning

SKI är positiv till den forskning som bedrivits om det nationella ansvaret sett i perspektiv av Sveriges medlemskap i EU, men vill att SKB fortsättningsvis bevakar händelser internationellt som kan påverka processen för hantering av använt kärnbränsle.

Nyvetenskap sedan Fud 2007

Två projekt har genomförts under perioden. Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan, KTH och Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg – i ett rättsligt perspektiv, Handelshögskolan, Göteborgs universitet.

Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan, KTH

Projektet Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan presenteras i åtta olika essäer och syftar till att sätta in kärnavfallsfrågan i ett vidare perspektiv /32-1/. Texterna argumenterar för ett rationellt förhållningssätt och framhåller vetenskapens och teknikens möjligheter. De tar inte ställning i konkreta frågor om hantering av kärnavfall eller om energipolitikens utformning. Däremot syftar de till att ge underlag för sådana ställningstaganden.

Risk och osäkerhet

Ordet ”risk” används ständigt i diskussioner om kärnavfall, liksom i andra diskussioner om de faror vi är utsatta för i samhället. Vid ett närmare betraktande visar det sig att ”risk” används i olika bemärkelser i olika sammanhang. I en del tekniska sammanhang är man noga med att skilja mellan å ena sidan risk, å andra sidan osäkerhet. Ibland verkar olika intressegruppers svårigheter att förstå varandra ha att göra med att de inte förstår (eller kanske inte respekterar) varandras användning av dessa begrepp. För att kunna föra en välstrukturerad diskussion är det viktigt att ha klart för sig vad som avses med orden, något som denna essä söker bidra till.

Strålning som etiskt problem

Frågor kring radioaktiv strålning väcker starka känslor. Är strålrisker alldeles särskilda, eller ska vi tänka om dem på samma sätt som andra risker vi stöter på i vår vardag? Denna essä presenterar det nya forskningsområdet strålningsetik och visar på sambanden mellan strålskyddets och moralfilosofins grundfrågor. Till de frågor som diskuteras hör: Kan det vara ett skäl att acceptera en strålexponering, när den är mindre än den naturligt förekommande bakgrundsstrålningen? Behöver vi ta hänsyn till (troliga) effekter som inte kan påvisas, eftersom de statistiska sambanden är för svaga? Bör strålskyddet främst ta hänsyn till den individuella exponeringen eller till den totala exponeringen av hela befolkningen?

Kärnavfallens tidsperspektiv

Den aspekt på kärnavfallet som blivit mest uppmärksammas är att det är farligt mycket långt in i framtiden. Längre har kärnavfallshanteringen varit den enda samhällsfråga som diskuterats brett i detta långa tidsperspektiv. På senare år har även klimatfrågan kommit att behandlas i mycket långa tidsperspektiv. Dessutom har vi fått en allmän diskussion om hållbar utveckling, som inte sätter några egentliga tidsgränser. Här presenteras de två huvudsakliga perspektiv i vilka man diskuterat mycket långsiktiga effekter av det vi gör i dag: Ekonomisk diskontering och hållbar utveckling. Problemen med båda dessa ansatser diskuteras, och alternativa förhållningssätt presenteras. Kärnavfallsfrågan visar sig vara en av många frågor som förtjänar en grundlig diskussion i ett långt tidsperspektiv.

Vetenskapen och dess begränsningar

Kontroverserna om hanteringen av kärnavfallet har till stor del handlat om möjligheterna att alls veta vad som kommer att hända i framtiden. Expertomdömen har satts i fråga, och ibland har tilltron till vetenskapens möjligheter att besvara de avgörande frågorna varit låg. Kritikerna har såtillvida rätt att vetenskapen inte är ofelbar. Det är ofta rationellt av en beslutsfattare att räkna med möjligheten att de vetenskapliga experterna kan ha fel. Det är bland annat av detta skäl som man brukar bygga in extra säkerhetsmarginaler i komplexa tekniska system. Men det är också en viktig insikt att människor i praktiken ständigt måste handla och fatta beslut, utan att vara helt säkra. Denna essä utmynnar i slutsatsen att det bästa vi kan göra är, att vid varje tidpunkt utgå från den då bästa tillgängliga vetenskapen, samtidigt som vi försöker att bedöma graden av osäkerhet i den aktuella vetenskapen och göra oss så oberoende som möjligt av den mest osäkra informationen.

Vad säger försiktighetsprincipen?

Det är viktigt att skilja mellan försiktighet och försiktighetsprincipen. Med försiktighet som allmänt begrepp menas att man undviker handlingar som kan leda till mycket negativa konsekvenser, även om sannolikheten för dem är låg. Försiktighetsprincipen handlar om hanteringen av vetenskaplig osäkerhet. Denna essä handlar om hur försiktighetsprincipen ska tolkas och hur den passar in i vårt sätt att bygga upp och tillämpa vetenskaplig kunskap. En viktig slutsats är att försiktighetsprincipen egentligen inte är någon särskild princip, utan bara handlar om att använda all tillgänglig information när man fattar praktiska beslut.

Hur mycket får det kosta?

Kostnads-nyttanalyser är den traditionella ekonomiska metoden att analysera riskbeslut. Men metoden är kontroversiell, inte minst eftersom många är tveksamma till de ”priser” på människoliv som används i analyserna. I denna essä diskuteras metodens för- och nackdelar. Slutsatsen blir att kostnads-nyttanalyser kan vara användbara, men att det är viktigt att vara medveten om dess begränsningar. Metoden kan användas för att stödja samhällsbeslut, men den kan inte vara sista ordet utan måste kombineras med andra beslutsunderlag.

Ingenjörsmässig säkerhet

Sedan mycket länge har ingenjörer utvecklat praktiska arbetsmetoder och regler för att undvika olyckor. Detta arbetsområde kallas på engelska ”safety engineering” men saknar ett etablerat namn på svenska. Det inrymmer traditioner för riskhantering som är värdefulla bland annat därför att de tar hand om en del av de problem som är svåra att täcka in i en riskanalys som bygger på sannolikheter. I denna essä presenteras tre av områdets viktigaste principer, nämligen inneboende säkerhet, säkerhetsfaktorer och multipla säkerhetsbarriärer. Jämförelser med den ”ingenjörfilosofi” som tillämpas inom andra teknikområden kan vara användbara i diskussioner om kärnavfallens förvaring.

Riskhantering som politisk fråga

Kärnavfallsfrågan är, liksom många andra riskfrågor politiskt sett, mycket komplicerad. I denna essä sätts riskfrågorna in i sitt samhällspolitiska sammanhang. Vilken arbetsfördelning bör eftersträvas mellan experter och förtroendevalda i de avgörande besluten? Ligger det något i den kritik mot

lokalt inflytande som brukar uttryckas med förkortningen Nimby (Not in my backyard)? Varför har begreppet "acceptans" fått så stort genomslag just i riskfrågor? Vilka krav kan man ställa på en demokratisk beslutsprocess i en kontroversiell riskhanteringsfråga? Syftet med denna liksom de övriga essäerna är, att visa hur kärnavfallsfrågorna hänger samman med större etiska och filosofiska frågor. Ställningstaganden får läsaren själv stå för.

Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg, Handelshögskolan, Göteborgs universitet

Ett övergripande syfte med projektet är att utreda och analysera hur olika typer av ansvar regleras enligt nu gällande lagstiftning om kärnteknisk verksamhet /32-2/. Projektet har undersökt om den ansvarsfördelning som etableras i svensk lagstiftning 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 en reformering?

Projektet består av tre delstudier:

1. Ansvar för en säker hantering av använt kärnbränsle.
2. Ansvar och parallell reglering.
3. Ansvar för icke-spridning av kärnvapen.

Ansvar för en säker hantering av använt kärnbränsle

Denna studie analyserar, med utgångspunkt i 10 § kärntekniklagen, de rättsliga konstruktioner som kringgärdar frågan om ansvarstagande för en säker hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle. Syftet är att synliggöra de rättsliga avvägningar som den kommande tillståndsprovningen står inför och därmed bidra till förståelsen av de rättsliga konstruktionernas betydelse för de beslut om slutförvar som Sverige har framfört sig. Vilken innebörd kommer kärntekniklagens krav på en "säker hantering och slutförvaring" av det använda kärnbränslet att ges i den kommande tillståndsprovningen?

Slutsatser som kan dras från denna delstudie är att den svenska regleringen av kärnteknisk verksamhet skapar förutsättningar för att utkräva ett långtgående industriellt ansvar av reaktorinnehavarna, men också förutsättningar för ett omfattande statligt inflytande över verksamheten. Av central betydelse i den modell för ansvarsfördelning som kärntekniklagen etablerat är Fud-programmen. De speglar den politiska viljan att kravet på "säker hantering" ska grundas i forskning. De lagstadgade formerna för hur programmet ska organiseras, speglar också intresset av att lägga stort ansvar för utförande och finansiering på industrin. Det finns också intresse för ett bibehållet och möjligtvis utökat utrymme för kontroll och inflytande från statens sida. Om förhoppningarna från 1980-talet vad gäller det allmännas inflytande över processen har uppfyllts, är däremot svårt att bedöma. Det realistiska svaret på frågan om innebörden av de krav som ställs i 10 § kärntekniklagen uppfylls, blir ändå att tolkningen ligger i händerna på den politiska majoritet som äger frågan när tillståndsprovningen sker. Frågan om vad som är säkert enligt kärntekniklagen är helt enkelt primärt politisk. I den mån det vid tidpunkten för beslutet finns en politisk majoritet som är kritisk till det ändamålsenliga i att bevilja tillstånd, kan en legal argumentation uppstå.

Ansvar och parallell reglering

I Sverige regleras ansvaret för omhändertagande av använt kärnbränsle i flera olika lagar som innebär att regelverken delvis överlappar varandra. Olika rapporter har särskilt uppmärksammat det faktum att tillstånd för ett slutförvar måste sökas både enligt kärntekniklagen och enligt miljöbalken. I denna delstudie beskrivs översiktligt den parallella regleringen av miljö, kärnsäkerhets- och strålskyddsfrågor på nationell och europeisk nivå. Inledningsvis behandlas den svenska regleringen avseende miljöansvar för joniserande strålning, där miljöbalken i dag inte är generell tillämplig. Här behandlas också regleringen av miljöansvar på europeisk nivå. Den visar att den uppdelning som återfinns i förhållandet mellan de svenska regleringarna, endast delvis återspeglas på europeisk nivå. Studien behandlar även relationen mellan EU-fördraget och Euratom och ger exempel på reglering av ansvar för avfallshantering respektive lämnande av upplysningar i samband med ansökningar om tillstånd för ett slutförvar. Slutligen tar delstudien upp vilka konsekvenser som denna typ av parallell reglering får för den svenska tillståndsprovningen.

Slutsatser som kan dras från delstudien är att det, på grund av den parallella regleringen på nationell nivå, föreligger vissa risker för överlappningar och motsägelser. Detta gäller inte minst villkoren för utkrävandet av miljöansvar och ansvar för kärnsäkerhet och strålskydd. Det verkar som det fortfarande finns oklarheter om i vilken utsträckning miljödomstolarna kan eller ska meddela villkor utifrån kärnsäkerhets- och strålskyddsaspekter. Denna otydlighet är en kvarleva från införandet av miljöbalken.

Den svenska parallella regleringen återfinns bara delvis på europeisk nivå. Det internationella regelverket följer till stor del en etablerad internationell regleringstradition. Den innebär att frågan om joniserande strålning är av sådan speciell och farlig art, att den bör regleras i särskild ordning.

Slutsatser från de parallella prövningar som gjorts i Sverige, till exempel vid tillstånd för effekt-höjning vid kärnkraftverken, tyder på att den rent praktiskt fungerar tillfredsställande. Studien framhåller dock att den eventuella otydlighet som finns, kan vara tveksam ur ett miljöansvarsperspektiv. Det finns också en potentiell risk att den parallella prövningen och den parallella regleringen skapar en otydlighet som påverkar legitimiteten för själva tillståndsbeslutet.

Ansvar för icke-spridning av kärnvapen

Den kanske största utmaningen för utvecklingen av civil kärnenergiproduktion är att skapa regelverk som effektivt hindrar att civil kärnteknisk verksamhet leder till en ökad kärnvapenspridning. Syftet med denna delstudie är att beskriva och analysera hur ansvaret för att upprätthålla internationella förpliktelser om icke-spridning, konkretiseras i samband med planeringen för ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige. Studien redogör för utvecklingen av den multilaterala regleringen för att förhindra spridning av kärnvapen och analyserar hur regelverket har genomförts på europeisk och nationell svensk nivå. Vilket ansvar åläggs den som innehar tillstånd att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle? Vilket är ansvarets omfattning och utsträckning i tiden och vilka potentiella problem kan finnas vid tillämpningen av den nuvarande regleringen?

Slutsatser som kan dras av delstudien är, att de komplexa regelsystem som reglerar genomförandet av internationella förpliktelser för att förhindra spridning av kärnvapen har en effektiv administrativ tillämpning i Sverige. Samtidigt finns det risk för att parallelliteten, mellan nationell svensk reglering och tillämpliga regler inom Euratom, leder till svårigheter att identifiera förpliktelser och linjer för utkrävande av ansvar. Dessa problem kan bli större om Sverige försöker värna en nationell reglerings-autonomi rörande icke-spridning samtidigt som den gemenskapsrättsliga regleringen på området blir alltmer finmaskig.

Den mest uppenbara problematiken som studien identifierar gällande ansvaret för Sveriges internationella förpliktelser om icke-spridning vid ett slutförvar, rör ansvarets utsträckning i tiden efter att driftfasen upphört och förslutning skett. Som den svenska regleringen i dag är utformad upphör SKB:s ansvar sannolikt inte vid den tidpunkt då skyldigheterna fullgjorts enligt kärntekniklagen. Slutpunkten definieras i stället av ett politiskt beslut om befrielse från ansvar, där i stället staten träder in. Samtidigt som SKB:s ansvar upphör, kvarstår dock statens skyldighet att leva upp till internationella förpliktelser om kärnvapenspridning och olovlig befattning med kärnämne. Konkret innebär detta att staten också får ansvaret att fullgöra skyldigheterna om kärnämneskontroll och fysiskt skydd av det förslutna slutförvaret. För att få en ökad förutsägbarhet och tydlighet finns det behov av att formulera kriterier för när ett beslut om ansvarsbefrielse kan och bör äga rum. I samband med övergången bör det också klargöras om staten inträder som ägare till slutförvaret och det använda kärnbränsle som förvaras där.

Program

Ett nytt forskningsprojekt har tillkommit som kommer att slutföras årsskiftet 2011/2012.

Kärnavfallens tidsperspektiv i jämförelse, Kungliga Tekniska högskolan

Projektet är en studie om hur tidsperspektivet i kärnavfallsfrågan förhåller sig till de tidsperspektiv som tillämpas inom andra samhällsområden. Den berör flera aspekter som hittills inte har uppmärksamats i forskningen.

Skillnaderna är mycket stora mellan de tidsperspektiv som tillämpas inom olika samhällsområden. Man kan till exempel jämföra kärnavfallet med klimatfrågan, där ett hundraårsperspektiv fortfarande är helt dominerande. Projektet kommer att undersöka bakgrunden till och konsekvenserna av dessa skillnader, samt även diskutera om och i så fall hur de borde minskas. Detta slags jämförelser med andra områden kan bidra till att skapa större klarhet om förutsättningarna för ett beslut om ett slutförvar för använt kärnbränsle. Studien har även relevans för andra samhällsområden. En systematisering av tidsperspektiven i viktiga samhällsbeslut är önskvärd, bland annat eftersom den kan bidra till en bättre samordning mellan lång- och kortsiktiga mål.

Varje beslut har egentligen tre olika tidsperspektiv – giltighetstid, värderingstid och effektid. Giltighetstiden är den förväntade tid under vilken beslutet kommer att gälla, till exempel tiden fram till dess att en omprövning ska ske. Värderingstiden är den tidsperiod som man har tagit hänsyn till i sin värdering av beslutets effekter. Värderingstiden är ofta längre än giltighetstiden. Effektiden är den tid under vilken beslutet i praktiken kommer att ha effekter. Effektiden är ofta till stor del given av naturliga och andra omständigheter, medan giltighets- och värderingstiderna är under beslutsfattarens kontroll. Förhållandet mellan effektid och värderingstid är olika för olika beslut. De sammanfaller till exempel för de avgörande besluten om omhändertagandet av använt kärnbränsle. I klimat- och infrastrukturbeslut är värderingstiden i allmänhet avsevärt kortare än effektiden.

Valet av tidsperspektiv, giltighets- och värderingstid, för ett beslut är en del av valet av beslutsram för detta beslut. Valet av beslutsram har också andra komponenter utöver tidsperspektivet, och kan påverka tidsperspektivet.

- *Aktörsperspektiv.* Ett och samma beslut eller beslutsområde kan diskuteras och beskrivas utifrån olika aktörers beslutsperspektiv. Det gör till exempel stor skillnad om man diskuterar kärnavfallsfrågan utifrån ett företagsperspektiv, där såväl lagstiftningen som energipolitiken tillhör de givna förutsättningarna, eller utifrån ett politiskt perspektiv där dessa är faktorer som kan påverkas genom de beslut man fattar.
- *Möjlighetsperspektiv.* Då man beskriver ett beslut inskränker man sig i regel till att nämna de beslutsalternativ som i någon mening uppfattas som möjliga att välja eller att genomföra. Man kan här välja mellan olika slags möjlighetskriterier. Det torde vara självklart att fysiskt omöjliga alternativ ska uteslutas, men det är inte självklart att alternativ som anses politiskt omöjliga ska tas bort.
- *Agenda-uppdelning.* Det kan finnas många sätt att dela upp ett beslutsområde i olika delbeslut. Denna uppdelning kan få stor betydelse för vilka beslut som i praktiken kommer att tas. Det finns både för- och nackdelar med de båda huvudstrategierna för att konstruera en agenda. Den ena strategin är att dela upp ett beslutskomplex i så oberoende delbeslut som möjligt. Den andra är att samla beslutsfrågorna till stora och samordnade delbeslut.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Oppublicerade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Del I

Kapitel 1

- 1-1 **SKB, 2000.** Systemanalys, Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-2 **SKB, 1992.** SKB 91 – Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Bergrundens betydelse för säkerheten. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-3 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-4 **SKB, 1995.** Översiktsstudie 95, Lokalisering av djupförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-5 **SKB, 1995.** SR 95, Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-6 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport Del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-7 **Morén L, Wikström M, 2007.** Systematisk kravhantering för KBS-3-systemet. SKB R-07-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Del II

Kapitel 5

- 5-1 **SKB, 2008.** Geovetenskapligt undersökningsprogram för utbyggnad av SFR. SKB R-08-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-2 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-3 **SKB, 2001.** Geovetenskapligt program för platsundersökning vid Forsmark. SKB R-01-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-4 **SKB, 2005.** Program för fortsatta undersökningar av geosfär och biosfär. Platsundersökning Forsmark. SKB R-04-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-5 **SKB, 2008.** Geovetenskapligt undersökningsprogram för utbyggnad av SFR. SKB R-08-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-6 **SSMFS 2008:1.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling.

Kapitel 6

- 6-1 **SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-2 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 7

- 7-1 **Hedin G, Gustavsson B, Carlsson J, 2004.** Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk. SKB R-04-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 7-2 **SKB, 2004.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar, ”guideline”. SKB R-04-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 7-3 **BKAB, 2008.** Avvecklingsplan för Barsebäcksverket, Dok-ID 1884576/4.0, 2008-04-28. Barsebäck Kraft AB.
- 7-4 **FKA, 2006.** Planering inför avveckling av FKA:s reaktoranläggningar, Dok-ID FKA-2005-54, rev 1, 2006-11-10. Forsmarks Kraftgrupp AB.
- 7-5 **OKG, 2005.** Planering inför avveckling av Oskarshamnverket, Dok-ID 2005-13396, utg 1, 2005-11-15. OKG Aktiebolag.
- 7-6 **RAB, 2005.** Avvecklingsplan Ringhals, Dok-ID 1848196/4.0, 2005-12-16. Ringhals AB.
- 7-7 **Hallberg B, Ekenborg F, Lindvall C G, 2006.** Avvecklingsplan för Ågestaanläggningen, Dok-ID QPD 934, 2006-05-02. Vattenfall AB.

- 7-8 **Hallberg B, Eriksson T, 2008.** Preliminär avvecklingsplan för Clink. SKB P-08-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 7-9 **SKB, 2008.** Plan 2008. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 7-10 **OECD/NEA, IAEA, EC, 1999.** A proposed standardised list of items for costing purposes in the decommissioning of nuclear installations. OECD/NEA.

Del III

Kapitel 8

- 8-1 **SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 8-2 **SKB, 2009.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 9

- 9-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 9-2 **SKB, 2008.** Horizontal deposition of canisters for spent nuclear fuel Summary of the KBS-3H. Project 2004–2007. SKB TR-08-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 10

- 10-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-2 **SKB, 2006.** Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility. SKB R-05-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 11

- 11-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-2 Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 12

- 12-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-2 **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.
- 12-3 **Wimelius H, Pusch R, 2008.** Buffer protection in the installation phase. SKB R-08-137, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-4 **Åberg A, 2009.** Effects of water inflow on the buffer – an experimental study. SKB R-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-5 **Karnland O, Olsson S, Nilsson U, 2006.** Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-6 **Thorsager P, Börgesson L, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Canister retrieval test. Report on installation. SKB IPR-02-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-7 **Goudarzi R, Åkesson M, Hökmark H, 2008.** Äspö Hard Rock Laboratory. Temperature Buffer Test. Sensors data report (Period 030326-080701 Report No: 12. SKB IPR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-8 **Börgesson L, Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Installation of buffer, canister, backfill and instruments in Section 1. SKB IPR-02-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-9 **Börgesson L, Gunnarsson D, Johannesson L-E, Karlzén R, Sandén T, 2004.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. SKB IPR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 13

- 13-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-2 **Wimelius H, Pusch R, 2008.** Backfilling of KBS-3V deposition tunnels – possibilities and limitations. SKB R-08-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 13-3 **Dixon D, Lundin C, Örtendahl E, Hedin M, Ramqvist G, 2008.** Deep repository – engineered barrier systems. Half scale test to examine water uptake by bentonite pellets in a block-pellet backfill system. SKB R-08-132, Svenska Kärnbränslehantering AB.
- 13-4 **Johannesson L-E, Sandén T, Dueck A, Olsson L, 2010.** Characterisation of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF. BACLO PROJECT PHASE 3. SKB R-10-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-5 **Dahlström L-O, Magnusson J, Gueorgiev G, Johansson M, 2009.** Feasibility study of a concrete plug made of low pH concrete. SKB R-09-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-6 **Fälth B, Gatter P, 2009.** Mechanical and thermo-mechanical analyses of the tapered plug for plugging of deposition tunnels. A feasibility study. SKB R-09-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-7 **Vogt C, Lagerblad B, Wallin K, Baldy F, Jonasson J-E, 2009.** Low pH self compacting concrete for deposition tunnel plugs. SKB R-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-8 **Dahlström L-O, 2009.** Experiences from the design and construction of plug II in the Prototype Repository. Prototype Repository. SKB R-09-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 14

- 14-1 **SKB, 2009.** Design Premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-2 **Pusch R, Ramqvist G, 2007.** Borehole project – Final report of Phase 3. SKB R-07-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 15

- 15-1 **SKB, 2009.** Design Premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-2 **SKB, 2009.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-3 **SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-4 **SKB, 2008.** Confidence assessment. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-5 **Peck, 1969.** Ninth Rankine Lecture: Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Geotechnique, 19;171-187.
- 15-6 **Eurocode EN 1997-1, 2004.** Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules. European Committee for standardization, CEN, Brussels.
- 15-7 **SKB, 2009.** Final repository facility. Underground design premises/D2. SKB R-07-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-8 **Munier R, 2007.** Demonstrating the efficiency of the EFPC criterion by means of Sensitivity analyses. SKB R-06-115, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-9 **Funchag J, 2008.** Injektering av TASS-tunneln. Delresultat t o m september 2008. SKB R-08-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-10 **Fransson Å, 2008.** Grouting design based on characterization of the fractured rock. Presentation and demonstration of a methodology. SKB R-08-127, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-11 **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.
- 15-12 **Bäckblom G, Christiansson R, Lagerstedt L, 2004.** Choice of rock excavation methods for the Swedish deep repository for spent nuclear fuel. SKB R-04-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-13 **Olsson M, Ouchterlony F, 2003.** Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. SveBeFo, Rapport 65, Stockholm 2003, ISSN 1104- 1773.
- 15-14 **Olsson M, Niklasson B, Wilson L, Andersson C, Christiansson R, 2004.** Äspö HRL. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB R-04-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-15 **Jonsson M, Bäckström A, Feng Q, Berglund J, Johansson M, Mas Ivars D, Olsson M, 2009.** ÄSPÖ Hard Rock Laboratory. Studies of factors that affect and controls the Excavation Damaged/ Disturbed Zone. SKB R-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-16 **Malmtoft J, Andersson C, Karlzén R, 2009.** Berguttag i TASS-tunneln. Delresultat t o m september. SKB R-08-122, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-17 **Heikkinen E, Kantia P, Lehtimäki T, Silvast M, Wiljanen B, 2010.** EDZ Assessments in Various Geological Environments Using GPR Method. Working Report 2010-04, POSIVA.
- 15-18 **Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-19 **Ericsson L O, Brinkhoff P, Gustafson G, Kvartsberg S, 2009.** Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. SKB R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 15-20 **Olsson M, Svärd J, Ouchterlony F, 2008.** Sprängskador från strängemulsion, fältförsök och förslag till skadezonstabell som innehåller samtidig upptändning. Dept of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Stockholm, Sverige 2008 Swebrec Rapport 2008:1.
- 15-21 **Autio J, Kirkkomäki T, 1996.** Boring full scale deposition holes using a novel blind boring method. SKB TR-96-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 16

- 16-1 **SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-2 **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.
- 16-3 **SKB, 2001.** Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering. SKB R-01-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-4 **SKB, 2008.** Horizontal deposition of canisters for spent nuclear fuel. Summary of the KBS-3H Project 2004-2007, SKB TR-08-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-5 **Smith P, Neall F, Snellman M, Pastina B, Hjerpe T, Nordman H, Johnson L, 2008.** Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Summary report. SKB R-08-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-6 **Autio J, Johansson E, Hagros A, Anttila P, Rönnqvist P-E, Börgesson L, Sandén T, Eriksson M, Halvarsson B, Berghäll J, Kotola R, Parkkinen I, 2008.** KBS-3H Design Description 2007. SKB R-08-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-7 **Halvarsson B, 2008.** Horizontal emplacement technique of supercontainer and distance blocks. Test evaluation report. SKB R-08-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-8 **Eriksson M, Lindström L, 2008.** KBS-3H post-grouting. Mega-Packer test at –220 m level at Äspö HRL. SKB R-08-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-9 **Apted M J, Bennet D G, Saario T, Savage D, Segle P, Sällfors G, 2009.** Evaluation of SKB/Posiva's report on the horizontal alternative of the KBS-3 method. 2009:35, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- 16-10 **Wersin P, Birgersson M, Olsson S, Karnland O, Snellman M, 2008.** Impact of corrosion-derived iron on the bentonite buffer within in the KBS-3H disposal concept. The Olkiluoto site as case study. SKB R-08-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-11 **Neall F, Pastina B, Snellman M, Smith P, Gripi P, Johnson L, 2008.** Safety assessment of a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto Complementary evaluations of safety. SKB R-08-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Del IV

Kapitel 17

- 17-1 **Rönnback P, Åström M, 2007.** Hydrochemical patterns of a small lake and a stream in an uplifting area proposed as a repository site for spent nuclear fuel, Forsmark, Sweden. *Journal of Hydrology* 344:223–235.
- 17-2 **Rönnback P, Åström M, Gustafsson J-P, 2008.** Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden. *Applied Geochemistry* 23:1862–1880.
- 17-3 **Peltola P, Brun C, Åström M, 2008.** High K/Rb ratios in stream waters – exploring plant litter decay, ground water and bedrock as potential controlling mechanisms. *Chemical Geology* 257:92–100.
- 17-4 **Åström M, Peltola P, Virtasalo J, Kotilainen A, Salminen, 2008.** Niobium in boreal stream waters and brackish-water sediments. *Geochemistry:Exploration, Environment, Analyses* 8:1–10.
- 17-5 **Åström M, Peltola P, Rönnback P, Lavergren U, Bergbäck B, Tarvainen T, Backman B, Salminen R, 2009.** Uranium in surface and ground waters in Boreal Europe. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 9:51–62.

Kapitel 18

- 18-1 **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.
- 18-2 **SKI, 2008.** SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SKB:s säkerhetsrapport SR-Can, SKI Rapport 2008:19, SSI Rapport 2008:04. Statens kärnkraftinspektion.
- 18-3 **SKB, 2008.** Säkerhetsredovisning SFR 1. Allmän del 1 och 2. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-4 **SKB, 2009.** Komplettering av Fud-program 2007. Loma-programmet och alternativa slutförvaringsmetoder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-5 **SSM, 2009.** Beslut gällande granskning och överlämnande av SKB:s komplettering av Fud-program 2007, SSM referens 2009/1365.

- 18-6 **SSM, 2009.** Beslut rörande säkerhetsredovisningen för SFR-1, SSM referens 2008/981.
- 18-7 **SKB, 2006.** Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 19

- 19-1 **Pässe T, 2004.** The amount of glacial erosion. SKB TR-04-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-2 **Näslund J O (ed), Wohlfarth B, Alexanderson H, Helmens K, Hättstrand M, Jansson P, Kleman J, Lundqvist J, Brandefelt J, Houmark-Nielsen M, Kjellström E, Strandberg G, Knudsen K L, Krogh Larsen N, Ukkonen P, Mangerud J, 2008.** Fennoscandian paleo-environment and ice sheet dynamics during Marine Isotope Stage (MIS) 3. Report of a workshop held September 20–21, 2007 in Stockholm, Sweden. SKB R-08-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-3 **Wohlfarth B, Näslund J O (ed), 2010.** Fennoscandian Ice Sheet in MIS 3. *Boreas* 39 (2): 325–456. Wiley-Blackwell.
- 19-4 **Wohlfarth B, 2009.** Ice-free conditions in Fennoscandia during Marine Oxygen Isotope Stage 3? SKB TR-09-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-5 **Helmens K, 2009.** Climate, vegetation and lake development at Sokli (northern Finland) during early MIS 3 at ~50 kyr: Revising earlier concepts on climate, glacial and vegetation dynamics in Fennoscandia during the Weichselian. SKB TR-09-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-6 **Houmark-Nielsen M, 2009.** MIS 3 interstadial climate and rapid ice advances in the south-western Baltic. SKB P-09-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-7 **Lundqvist J, 1992.** Glacial stratigraphy in Sweden. Geological Survey of Finland Special Paper 5, p. 43–59.
- 19-8 **Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, Carlson A E, Clark J, Wohlfarth B, Mitrovica J X, Hostetler S W, McCable A M, 2009.** The Last Glacial Maximum. *Science* 325:710–714. DOI:10.1126/science.1172873.
- 19-9 **Wohlfarth B, 2010.** Ice free conditions in Sweden during Marine Oxygen Isotope Stage 3? *Boreas* 39 (2):377–395.
- 19-10 **Ampel L, Bigler C, Wohlfarth B, Risberg J, Lotter A F, Veres D, 2010.** Modest summer temperature variability during DO cycles in western Europe. *Quaternary Science Reviews* 29:1322–1327.
- 19-11 **Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-12 **Jansson P, Näslund J O, Rodhe L, 2007.** Ice sheet hydrology – a review. SKB TR-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-13 **Jansson P, Näslund J O, 2009.** Spatial and temporal variations in glacier hydrology on Storglaciären, Sweden. SKB TR-09-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-14 **SKB, 2006.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-15 **Lund B, Näslund J O, 2009.** Glacial isostatic adjustment: implications for glacially induced faulting and nuclear waste repositories. I: Connor, C.B., Chapman, N.A. and Connor, L.J. (eds.): Volcanic and tectonic Hazard Assessment for Nuclear facilities. Kapitel 5. Cambridge University Press, Cambridge. S. 142–155.
- 19-16 **Whitehouse P, 2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. SKB TR-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-17 **Brydsten L, Engqvist A, Näslund J O, Lindborg T, 2009.** Expected extreme sea levels at Forsmark and Laxemar-Simpevarp up until year 2100. SKB TR-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-18 **Rahmstorf S, 2007.** A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, 368–370.
- 19-19 **Sundberg J, Back P E, Ländell M, Sundberg A, 2009.** Modelling of temperature in deep bore holes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. SKB TR-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-20 **Helmens K F, Bos J A A, Engels S, Van Meerbeeck C J, Bohncke S J P, Renssen H, Heiri O, Brooks S J, Seppä H, Birks H J B, Wohlfarth B, 2007.** Present-day temperatures in northern Scandinavia during the Last Glaciation. *Geology*, 35:987–990.
- 19-21 **Engels S, Bohncke S J P, Bos J A A, Brooks S J, Heiri O, Helmens K F, 2008.** Chironomid-based palaeotemperature estimates for northeast Finland during Oxygen Isotope Stage 3. *Journal of Palaeolimnology*, 40:49–61.
- 19-22 **Bos J A A, Helmens K F, Bohncke S J P, Seppä H, Birks H J B, 2009.** Flora, vegetation and climate at Sokli, northeastern Fennoscandia, during the Weichselian Middle Pleniglacial. *Boreas*, 38:335–348.
- 19-23 **Helmens K F, Risberg J, Jansson K N, Weckstöm J, Berntsson A, Kaislahti Tillman P, Johansson P W, Wastegård S, 2009.** Early MIS 3 glacial lake evolution, ice-marginal retreat pattern and climate at Sokli (northeastern Fennoscandia). *Quaternary Science Reviews*, 28:1880–1894.

- 19-24 **Väliranta M, Birks H H, Helmens K F, Engels S, Piirainen M, 2009.** Early Weichselian interstadial (MIS 5c) summer temperatures were higher than today in northern Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 28:777–782.
- 19-25 **Helmens K F, Engels S, 2010.** Ice-free conditions in eastern Fennoscandia during early Marine Isotope Stage 3:lacustrine records. *Boreas* 39(2):399–409.
- 19-26 **Engels S, Helmens K F, Väliranta M, Brooks J, Birks H J B, 2010.** Early Weichselian (MIS-5d and 5c) temperatures and environmental changes as recorded by chironomids and macroremains at Sokli (northern Fennoscandia). *Boreas*. no. doi: 10.1111/j.1502-3885.2010.00163.x
- 19-27 **Engels S, Bohncke S J P, Bos J A A, Helmens K F, Heiri O, 2006.** Chironomid-based inferences of local and regional environmental change during the early Middle Weichselian in Northeast Finland. *Proceedings of the “16th International Chironomid Symposium”, Funchal, Madeira, Portugal, 25–28 July.*
- 19-28 **Bos J A A, Bohncke S J P, Engels E, Helmens K F, Coope G R, 2007.** Abrupt climatic events during OIS3 recorded in terrestrial sediments in NW Europe:multi-proxy approach. 17th INQUA congress, Cairns, Australia.
- 19-29 **Helmens K F, Bos J A A, Engels E, Seppä H, Bohncke S J P, Van Meerbeek C J, Renssen H, Risberg J, Wohlfarth B, 2007.** Ice free and warm conditions in the central area of the Scandinavian glaciations during MIS 3. 17th INQUA congress, Cairns, Australia.
- 19-30 **Helmens K F, Bos J A A, Engels S, Van Meerbeek C J, Seppä H, Birks H J B, Brooks S J, Risberg J, Wohlfarth B, 2007.** Present-day temperatures at Sokli (northern Finland) during MIS 3 recorded by high-resolution multi-proxy analysis and climate modeling. 1th NEPAL workshop, Tallinn, Estonia.
- 19-31 **Kaislahti-Tillman P, Berntsson A, Risberg J, Helmens K F, Jansson K, 2007.** Diatom stratigraphy of the MIS 3 deposit at Sokli, Northern Finland. *Nordic Diatomists Meeting, Lillehammer, Norway.*
- 19-32 **Väliranta M, Helmens K F, 2007.** Palaeobotanical and lithological review of a 7-m-thick sediment sequence, dated to MIS 5d-c, from Sokli, Finnish Lapland:preliminary results and interpretation. 1th NEPAL workshop, Tallinn, Estonia.
- 19-33 **Helmens K F, Seppä H, Bos J A A, Engels S, Väliranta M, Birks H J B, 2008.** Weichselian vegetation dynamics in the central area of the Scandinavian glaciations recorded in a long sediment sequence from Sokli (N-Finland). 33rd IGC congress, Oslo, Norway.
- 19-34 **Väliranta M, Birks H H, Helmens K F, 2008.** Early Weichselian botanical features in Finnish Lapland. 33rd IGC congress, Oslo, Norway.
- 19-35 **Helmens K F, 2009.** Late Quaternary climate variability in high latitude northern Europe:data-model comparison. 4th BBCC (Bert Bolin Climate Centre, Stockholm University) annual meeting, Stockholm, Sweden.
- 19-36 **Helmens K F, Engels S, Väliranta M, Bergman J, 2009.** Environmental and climate conditions at Sokli (N Finland) during MIS 5d-c:first integration of multi-proxy evidence. 3rd NEPAL (Nordic Network of Palaeoclimatology, NordForsk) workshop, Bergen, Norway.
- 19-37 **Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000 year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-38 **Brandefelt J, Otto-Bliesner B L, 2009.** Equilibrium and variability in a Last Glacial Maximum climate simulation with CCSM3. *Geophysical Research Letters* 36, L19712, doi:10.1029/2009GL040364.
- 19-39 **Kjellström E, Brandefelt J, Näslund J O, Smith B, Strandberg G, Voelker A H L, Wohlfarth B, 2010.** Simulated climate conditions in Europe during a MIS 3 stadial. *Boreas* 143:436–456.
- 19-40 **Brandefelt J, Strandberg G, 2007.** Simulating extreme climate conditions in Sweden in a 100,000 year perspective. Abstract ICESM2007-A-00035 for the Second International Conference on Earth System Modelling (ICESM).
- 19-41 **Kjellström E, Brandefelt J, Strandberg G, Smith B, Wohlfarth B, Näslund J O, 2008.** Global and regional climate model simulations of extreme climate conditions in Sweden in a 100,000 year perspective. EGU2008-A-02249. Abstracts of the contributions of the EGU General Assembly 2008. *Geophysical Research Abstracts*, 10. ISSN:1029-7006.
- 19-42 **Strandberg G, Brandefelt J, Kjellström E, 2008.** Modelling last glacial maximum climate variability with a high resolution regional climate model. EGU2008-A-03244. Abstracts of the contributions of the EGU General Assembly 2008. *Geophysical Research Abstracts* 10. ISSN:1029-7006.
- 19-43 **Kjellström E, Brandefelt J, Strandberg G, Smith B, Wohlfarth B, Näslund J O, 2009.** Global and regional climate model simulations of extreme climate conditions in Sweden in a 100,000 year perspective. UN Climate Change Conference March 2009, Copenhagen. *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. Earth and Environmental Science* 6. doi:10.1088/1755-1307/6/7/072035.
- 19-44 **Strandberg G, Brandefelt J, Kjellström E, 2009.** High-resolution regional climate model simulations for a 50-year period under Last Glacial Maximum conditions. Abstracts of the contributions of the EGU General Assembly 2009. *Geophysical Research Abstracts* 11.

- 19-45 **Strandberg G, Brandefelt J, Kjellström E, Smith B, 2009.** Simulating cold palaeo climate conditions in Europe with a regional climate model. 2nd Lund Regional-scale Climate Modelling Workshop: 21st Century Challenges in Regional-scale Climate Modelling.
- 19-46 **Brandefelt J, Kjellström E, Näslund J-O, Strandberg G, Voelker A, Wohlfarth B, 2010.** The importance of equilibration in glacial climate simulations. Abstracts of the contributions of the EGU General Assembly 2010. Geophysical Research Abstracts 12, EGU2010-12736, 2010.
- 19-47 **Ruskeeniemi T, Lehtinen A, Näslund J O, Belfadhel M, Aaltonen I, Claesson Liljedahl L, Hobbs M, Pratt L, Puigdomenech I, Selroos J O, Vähänen M, 2008.** Ice sheet hydrology and its impact on deep groundwaters – research project in western Greenland. IPY meeting, GTK Helsinki.
- 19-48 **Lehtinen A, Claesson Liljedahl L, Näslund J O, Ruskeeniemi T, 2009.** Future ice ages and the challenges related to final disposal of nuclear waste: The Greenland Ice Sheet Hydrology Project. EGU meeting, Vienna.
- 19-49 **Kalinowski B, Söderlund B, Claesson Liljedahl L, 2009.** Ecosystems at Permafrost Conditions using South-West Greenland as a Natural Analogue to the Swedish Candidate Sites. ICEM09/DECOM09, Liverpool.
- 19-50 **Vorauer A, Belfadhel M, Hirschorn S, Garisto F, 2009.** Understanding the impact of future glaciation on the performance of a Canadian deep geological repository for used nuclear fuel. Portland GSA Annual Meeting.
- 19-51 **Makahnouk M, Henkemans E, Frappe S, Ruskeeniemi T, Lintinen P, Hobbs M, 2009.** Geochemical and isotopic characterization of surface and ground water from an area of continuous permafrost adjacent to the Greenland ice sheet, Kangerlussuaq, Greenland. GSA Annual Meeting, Portland.

Kapitel 20

- 20-1 **Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE – Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 20-2 **Magnusson Å, Stenström K, Aronsson P-O, 2007.** Characterization of ¹⁴C in process water systems, spent resins and off-gas of Swedish LWRs. Report 01/07 Lund University, Department of Physics, Division of Nuclear Physics.
- 20-3 **Lundgren K, Ingemansson T, Wikmark G, 2002.** Carbon-14 in Nordic BWRs – Production and chemical forms. SSI Project 1294.01. Skultuna.
- 20-4 **Park S D, Lee H N, Ahn H J, Kim J S, Han S H, Jee K Y, 2006.** Distribution of ¹⁴C and ³H in low level radioactive wastes generated by wet streams from pressurized water reactors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol 207, No. 3, 507–514.
- 20-5 **TLG Services Inc, 2008.** Decommissioning Cost Analysis for Barsebäck Nuclear Station. Document S33-1567-002, Rev. 0, TLG Services, Inc.
- 20-6 **Höglund L O, 2001.** Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-7 **Damidot D, Glasser F P, 1995.** Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-CaCO₃-H₂O system at 25°C and the influence of Na₂O. Advances in Cement Research (27), 129–134.
- 20-8 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR. Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-9 **Small J, Nykyri M, Helin M, Hovi U, Sarlin T, Itävaara M, 2008.** Experimental and modelling investigations of the biogeochemistry of gas production from low and intermediate level radioactive waste. Applied geochemistry 23, 1383–1418.
- 20-10 **Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 20-11 **Pedersen K, 2001.** Microbial features, events and processes in the Swedish final repository for low- and intermediate-level radioactive waste. SKB R-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-12 **Petterson M, Elert M, 2001.** Characterisation of bitumenised waste in SFR 1. SKB R-01-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-13 **Moreno L, Neretnieks I, 1991.** Some calculations of radionuclide release from the Silo repository. SKB SFR 91-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-14 **Höglund L O, 1989.** Effects of degradation products from ion exchange resins on the concrete structures in the SFR Silo repository. SFR Technical PM no. 52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-15 **Ewart F, Greenfield B F, Haworth A, Rosevear A, Williams S J, 1991.** The effects of organics in SFR on sorption coefficients. SKB Progress Report SFR 91-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-16 **Allard B, Persson G, Torstenfelt B, 1985.** Organic complexing agents in low- and medium-level radioactive waste. Nagra TR-85-19 (TRs 85-18/-19/-20/-21) Nagra, Cédra, Cibra.
- 20-17 **Bradburry M H, Van Loon, 1998.** Cementitious near-filed sorption database for performance assessment of a L/ILW repository in a palfris host rock. PSI Bericht nr 98-1, January 1998, ISSN 1019-0643; CEM-94:Update I, June 1997.

- 20-18 **Cronstrand P, 2005.** Assessment of uncertainty intervals for sorption coefficients – SFR-1 uppföljning av SAFE. SKB R-05-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-19 **Fanger G, Skagius K, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE Complexing agents in SFR. SKB R-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-20 **Bradburry M H, Sarrott FA, 1994.** Sorption databases for the cementitious near-field of a L/ILW repository for performance assessment. Nagra TR 93-08.
- 20-21 **Van Loon L R, Hummel W, 1999.** Radiolytic and chemical degradation of strong acidic ion exchange resins: study of the ligands formed. Nuclear Technology 128, 359–370
- 20-22 **Van Loon L R, Kopajtic Z, 1991.** Complexation of Cu²⁺, Ni²⁺, and UO₂²⁺ by radiolytic degradation products of bitumen, Radiochim. Acta 54, 193–198.
- 20-23 **Glaus M A, Van Loon L R, 2008.** Degradation of Cellulose under Alkaline Conditions: New Insights from a 12 Years Degradation Study. Environ. Sci. Technol. 42, 2906–2911.
- 20-24 **Loudon G M, 1984.** Organic Chemistry. Addison-Wesley Publ. Comp, Reading, Mass. Sid. 1022.
- 20-25 **Lide D R, (ed) 1992.** Handbook of Chemistry and Physics, 1992a. 73:8–40.
- 20-26 **Rodwell W R, Harris A W, Horseman S T, Lalieux P, Müller W, Ortiz Amaya L, Preuss K, 1999.** Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste. A joint EC/NEA status report, EUR 19122 EN.
- 20-27 **SKB, 2008.** Säkerhetsredovisning SFR 1, Allmän del 2 – Långsiktig säkerhet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-28 **SKB, 2006.** Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-29 **Hunter R J, 1987.** Foundations of colloid science. Vol. I, Clarendon Press, Oxford, pp 89–100.
- 20-30 **Smellie J A T (ed), 1998.** Maqarin Natural Analogue Study: Phase III, Vol. I and II. SKB TR 98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-31 **Wieland E, Tits J, Bradbury M H, 2004.** The potential effect of cementitious colloids on radionuclide mobilisation in a repository for radioactive waste. Appl. Geochem., 19:119–135.

Kapitel 21

- 21-1 **Höglund L O, 2001.** Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-2 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR. Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-3 **Lagerblad B, Trägårdh J, 1994.** Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear waste repository, SKB TR-95-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-4 **Engkvist I, Albinsson Y, Johansson Engkvist W, 1996.** The long-term stability of cement. Leaching tests. SKB TR 96-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-5 **Brown P W, Lacroix P, 1989.** The kinetics of ettringite formation, Cement and Concrete Research 19 (6), 879–884.
- 21-6 **Damidot D, Glasser F P, 1993.** Thermodynamic investigation of the CaO-AL₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 25° C and the influence of Na₂O. Cement and Concrete Research (23), 6, 221–238.
- 21-7 **Damidot D, Stronach S, Kindness A, Atkins M, Glasser F P, 1994.** Thermodynamic investigation of the CaO-AL₂O₃-CaCO₃-H₂O system at 25° C and the influence of Na₂O. Cement and Concrete Research (24), 563–572.
- 21-8 **Damidot D, Glasser F P, 1995.** Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-CaCO₃-H₂O system at 25°C and the influence of Na₂O. Advances in Cement Research (27), 129–134
- 21-9 **Clodic L, Meike A, 1997.** Thermodynamics of Calcium Silicate Hydrates, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-132088.
- 21-10 **Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-11 **Moreno L, Neretnieks I, 1991.** Some calculations of radionuclide release from the Silo repository. SKB SFR 91-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-12 **Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2002.** Project SAFE – Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-13 **Björkenstam E, 1997.** Utveckling av SFR-bruket. Vattenfall Rapport UC 97:4Ö, Vattenfall Utveckling AB, Betongteknik, Älvkarleby.
- 21-14 **Pusch R, Hökmark H, 1987.** Megaparameterstudie av gastransport genom SFR-buffertar. SKB SFR 87-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-15 **Sellin P, Harrington J, 2006.** Large-Scale Gas Injection Test (Lasgit). In Proceedings of the 11th International High-Level Radioactive Waste Management Conference. Las Vegas, April 30 – May 4, 2006. American Nuclear Society. pp 792–797.

- 21-16 **Shimura T, Fujiwara A, Vomvoris S, Marschall P, Lanyon G W, Ando K, Yamamoto S, 2006.** Large-scale gas migration test at Grimsel test site. In: Proceedings of the 11th International High-Level Radioactive Waste Management Conference. Las Vegas, 30 April – 4 May 2006. American Nuclear Society, pp 784–791.
- 21-17 **Betongföreningen, 2007.** Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner. Betongrapport nr 12, Stockholm, ISBN 91-973445-8-3.
- 21-18 **SKB, 2008.** Säkerhetsredovisning SFR 1, Allmän del 2 – Långsiktig säkerhet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-19 **Fredriksson A, 2000.** PM angående långtidsstabilitet hos bergrum och tunnlar i SFR. Version 001, Golder Grundtteknik KB, 2000-08-16.
- 21-20 **Cronstrand P, 2007.** Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-21 **Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-22 **Cronstrand P, 2005.** Assessment of uncertainty intervals for sorption coefficients – SFR-1 uppföljning av SAFE. SKB R-05-75, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-23 **Andersson M, Ervanne H, Glaus M A, Holgersson S, Karttunen P, Laine H, Lothenbach B, Puigdomenech I, Schwyn B, Snellman M, Ueda H, Vuorio M, Wieland E, Yamamoto T, 2009.** Development of methodology for evaluation of long-term safety aspects of organic cement paste components. Posiva, Working Report 2008-28.
- 21-24 **Hunter R J, 1987.** Foundations of colloid science. Vol. I, Clarendon Press, Oxford, pp 89-100.
- 21-25 **Lindgren M, Pettersson M, Karlsson S, Moreno L, 2001.** Project SAFE. Radionuclide release and dose from the SFR repository. SKB R-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 22

- 22-1 **Johnson L H, Tait J C, 1997.** Release of segregated nuclides from spent fuel. SKB TR 97-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-2 **Johnson L H, McGinnes D F, 2002.** Partitioning of radionuclides in Swiss power reactor fuels. Nagra Technical report 02-07.
- 22-3 **Johnson L H, Ferry C, Poinssot C, Lovera P, 2005.** Spent fuel radionuclide source term for estimating spent fuel performance in geological disposal. Part 1. Assessment of the instant release fraction, J. Nucl. Mater. 346 pp 56–65.
- 22-4 **Ferry C, Piron J-P, Poulesquen A, Poinssot C, 2008.** Radionuclide release from spent fuel under disposal conditions: Re-evaluation of the Instant Release Fraction. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1107, pp 447–454.
- 22-5 **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-Site. SKB TR 04-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-6 **Matsson I, Grapengiesser B, Andersson B, 2007.** On site γ -ray spectroscopic measurement of fission gas release in irradiated nuclear fuel, Applied radiation and isotopes 65 pp 36–45.
- 22-7 **Oldberg K, 2009.** Distribution of fission gas release in 10x10 fuel. SKB TR-09-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-8 **Nordström E, 2009.** Fission gas release data for Ringhals PWRs. SKB TR-09-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-9 **Kamikura K, 1992.** FP gas release behaviour of high burnup MOX fuels for thermal reactors. Proc. of Technical Committee Meeting on Fission Gas Release and Fuel Rod Chemistry Related to Extended Burnup, Pembroke, Ontario, Canada, 28 April–1 May 1992, IAEA-TECDOC-697, p 82.
- 22-10 **Gray W J, Strachan D M, Wilson C N, 1992.** Gap and grain boundary inventories of Cs, Tc and Sr in spent LWR fuel. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 257, 353–360.
- 22-11 **Gray W J, 1999.** Inventories of iodine-129 and cesium-137 in the gaps and grain boundaries of LWR fuels. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 556, 487–494.
- 22-12 **Roudil D, Jégou C, Broudic V, Muzeau B, Peugeot S, Deschanel X, 2007.** Gap and grain boundary inventories from pressurized water reactor spent fuels, J. Nucl. Mater. 362, pp 411–415.
- 22-13 **Ekeröth E, Low J, Zwicky H-U, Spahiu K, 2009.** Corrosion studies with high burnup LWR fuel in simulated groundwater. Mat Res Soc Symp. Proc Vol. 1124, Q02-07.
- 22-14 **Bienvenu P, Cassette P, Andreoletti G, Be´ M-M, Comte J, Lépy M-C, 2007.** A new determination of 79Se half-life. Applied Radiation and Isotopes 65, 355–364
- 22-15 **He M, Jiang S, Jiang S, Diao L, Wu S, Li C, 2002.** Measurement of the half-life of Se-79 with PX-AMS. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 194, 393–398.
- 22-16 **Schrader H, 2004.** Half-life measurements with ionization chambers – A study of systematic effects and results. Applied Radiation and Isotopes 60, 317–323

- 22-17 **Oversby V M, 1996.** Criticality in a high-level waste repository. A review of some important factors and an assessment of the lessons that can be learned from the Oklo reactor. SKB TR 96-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-18 **Oversby, V M, 1998.** Criticality in a repository for spent fuel: lessons from Oklo. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 506, p 781.
- 22-19 **Van Konyenburg R A, 1995.** Comments on the draft paper “Underground supercriticality from plutonium and other fissile material” written by C D Bowman and F Venneri (LANL).
- 22-20 **Nicot J-P, 2008.** Methodology for bounding calculations of nuclear criticality of fissile material accumulations external to a waste container at Yucca Mountain, Nevada. Appl. Geochem. Vol. 23, pp 2065–2081.
- 22-21 **Smart N R, Rance A P, Werme L, 2005.** Effect of radiation on anaerobic corrosion of iron. SKB TR-05-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-22 **Pastina B, Isabey J, Hickel B, 1999.** The influence of water chemistry on the radiolysis of primary coolant water in pressurized water reactors. J. Nucl. Mat., 264, pp 309–318.
- 22-23 **Grambow B, Loida A, Dressler P, Geckeis H, Gago J, Casas I, de Pablo J, Gimenez J, Torrero M E, 1996.** Long-term safety of radioactive waste disposal: Chemical reaction of fabricated and high burnup spent fuel with saline brines. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5702.
- 22-24 **Grambow B, Loida A, Martinez-Esparza A, Diaz-Arocas P, de Pablo J, Paul J-L, Marx G, Glatz J-P, Lemmens K, Ollila K, Christensen H, 2000.** Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form. European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 19140 EN 2000.
- 22-25 **Kelm M, Bohnert E, 2004.** A kinetic model for the radiolysis of chloride brine, its sensitivity against model parameters and a comparison with experiments. FZKA 6977 Report, Forschungszentrum Karlsruhe.
- 22-26 **Kelm M, Bohnert E, 2005.** Gamma radiolysis of NaCl brine: Effect of dissolved radiolysis gases on the radiolytic yield of long-lived products. J. Nucl. Mater. 346 pp 1–4.
- 22-27 **Metz V, Bohnert E, Kelm M, Schild D, Reinhardt J, Kienzler B, Buchmeiser M, 2007.** γ -radiolysis of NaCl brine in the presence of $\text{UO}_2(\text{s})$: Effects of hydrogen and bromide. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 985 pp 33–40.
- 22-28 **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.
- 22-29 **Jegou C, Peugeot S, Broudic V, Roudil D, Deschanels X, Bart J M, 2004.** Identification of the mechanism limiting the alteration of clad spent fuel segments in aerated carbonated groundwater, J. Nucl. Mater. 326 pp 144–155.
- 22-30 **Hanson B, 2008.** Examining the conservatism in dissolution rates of commercial spent nuclear fuel, Proc. Int. High-Level Waste Management Conf., ANS, Las Vegas, pp 404–411.
- 22-31 **Hanson B, Stout R, 2004.** Re-examining the dissolution of spent fuel: A comparison of different methods for calculating rates. Mat. Res. Symp. Proc. Vol. 824 pp 89–94.
- 22-32 **Hanson B, Friese J, Soderquist C, 2004.** Initial results from dissolution testing of spent fuel under acidic conditions. Mat. Res. Symp. Proc., Vol. 824, pp 113–118.
- 22-33 **Casella A, Hanson B, Miller W, 2008.** Factors affecting UO_2 dissolution under geological disposal conditions. Proc. Int. High-Level Waste Management Conf., ANS, Las Vegas, pp 388–394.
- 22-34 **He H, Keech P, Brockowski M, Noel J, Shoemith D, 2007.** Characterisation of the influence of fission product doping on the anodic reactivity of uranium dioxide. Can. J. Chem. 85, pp 1–12.
- 22-35 **Grandstaff D E, 1976.** A Kinetic study of the dissolution of uraninite. Economic Geology, 71 pp 1493–1506.
- 22-36 **Mazeina L, Navrotsky A, Greenblatt M, 2008.** Calorimetric determination of energetics of solid solutions of UO_{2+x} with CaO and Y_2O_3 . J. Nucl. Mater. 373, pp 39–43.
- 22-37 **Fors P, Carbol P, Van Winkel S, Spahiu K, 2008.** High burnup fuel corrosion under reducing conditions. Proc. Int. High-Level Waste Management Conf., ANS, Las Vegas, pp 380–387.
- 22-38 **Fors P, Cabol P, Van Winkel S, Spahiu K, 2009.** Corrosion of high burn-up structured UO_2 fuel in the presence of dissolved H_2 . J. Nucl. Mater. 394 pp 1–8.
- 22-39 **Carbol P, Fors P, Van Winkel S, Spahiu K, 2009.** Corrosion of irradiated MOX fuel in presence of dissolved H_2 . J. Nucl. Mater, 392 pp 45–54.
- 22-40 **Cui D, Ekeroth E, Fors P, Spahiu K, 2008.** Surface mediated processes in the interaction of spent fuel or α -doped UO_2 with H_2 . Mat Res Soc Symp. Proc Vol. 1104, pp 87–99.
- 22-41 **Eriksen T E, Jonsson M, Merino J, 2008.** Modelling time resolved and long contact time dissolution studies of spent nuclear fuel in 10 mM carbonate solution – A comparison between two models and experimental data. J. Nucl. Mater. 375, pp 331–339.
- 22-42 **Rondinella V V, Cobos J, Wiss T, 2004.** Leaching Behaviour of Low-Activity Alpha-Doped UO_2 . Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 824, pp 167–173.

- 22-43 **Muzeau B, Jégou C, Delaunay F, Broudic V, Brevet A, Catalette H, Simoni E, Corbel C, 2009.** Radiolytic oxidation of UO₂ pellets doped with alpha emitters (^{238/239}Pu). *J. All. Comp.* 467, pp 578–589.
- 22-44 **Poinssot C, Ferry C, Poulesquen A, 2007.** New perspectives for the spent nuclear fuel radionuclides release model in a deep geological repository. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 945*, pp 111–116.
- 22-45 **Ollila K, 2006.** Dissolution of unirradiated UO₂ and UO₂ doped with ²³³U in 0.01 M NaCl under anoxic and reducing conditions. POSIVA Report 2006-08. Olkiluoto, Finland:Posiva Oy. 87 p.
- 22-46 **Ollila K, 2008.** Dissolution of unirradiated UO₂ and UO₂ doped with ²³³U in low and high ionic strength NaCl under anoxic and reducing conditions. POSIVA Working Report 2008-50. Olkiluoto, Finland:Posiva Oy. 34 p.
- 22-47 **Carbol P, Fors P, Gouder T, Spahiu K, 2009.** Hydrogen suppresses nuclear waste corrosion. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73 pp 4366–4375.
- 22-48 **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.
- 22-49 **Cachoir C, Lemmens K, Mennecart T, 2007.** The effect of H₂ on UO₂ dissolution in the presence of engineered barrier clay. Deliverable 1.5.23, EU-Project NF-PRO.
- 22-50 **Spahiu K, 2007.** Discussion of the results on α -doped UO₂ and spent fuel leaching in the presence of a corroding container and comparison with literature data. Deliverable 1.5.20, EU-Project NF-PRO.
- 22-51 **Broczkowski M, Goldik J, Santos B, Noël J, Shoesmith D, 2006.** Corrosion of nuclear fuel inside a failed copper nuclear waste container. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 985* pp 3–14.
- 22-52 **Broczkowski M, Noël J, Shoesmith D, 2005.** The inhibiting effects of hydrogen on the corrosion of uranium dioxide under nuclear waste disposal conditions. *J. Nucl. Mater* 346 pp 16–23.
- 22-53 **Broczkowski M, Noël J, Shoesmith D, 2007.** The influence of dissolved hydrogen on the surface composition of doped uranium dioxide under aqueous corrosion conditions. *J. Electroanal. Chem.* 602 pp 8–16.
- 22-54 **Nilsson S, Jonsson M, 2008.** On the catalytic effect of UO₂(s) and Pd(s) on the reaction between H₂O₂ and H₂ in aqueous solution. *J. Nucl. Mater.* 372, pp 160–163.
- 22-55 **Nilsson S, Jonsson M, 2008.** On the catalytic effect of Pd(s) on the reduction of UO₂²⁺ with H₂ in aqueous solution. *J. Nucl. Materials* 374, pp 290–292.
- 22-56 **Trummer M, Nilsson S, Jonsson M 2008.** On the effects of fission product noble metal inclusions on the kinetics of radiation induced dissolution of spent nuclear fuel. *J. Nucl. Mater.* 378 pp 55–59.
- 22-57 **Trummer M, Roth O, Jonsson M, 2009.** H₂ inhibition of radiation induced oxidative dissolution of spent fuel. *J. Nucl. Mater.* 383 pp 226–230.
- 22-58 **Trummer M, Jonsson M, 2010.** Resolving the H₂-effect on radiation induced of UO₂-based spent nuclear fuel. *J. Nucl. Mater.* 396 pp 163–169.
- 22-59 **Cui D, Ranebo Y, Low J, Rondinella V, Pan J, Spahiu K, 2009.** Immobilization of radionuclides on iron canister material at simulated near-field conditions. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1124*, Q 02-04.
- 22-60 **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. *J. Nucl. Mater.* 359 pp 1–7.
- 22-61 **Nielsen F, Jonsson M, 2008.** Simulations of H₂O₂ concentration profiles in the water surrounding spent nuclear fuel taking mixed radiation fields and bulk reactions into account. *J. Nucl. Mater.* 374 pp 281–28.
- 22-62 **Nielsen F, Ekeröth E, Eriksen T E, Jonsson M, 2008.** Simulation of radiation induced dissolution of spent nuclear fuel using the steady state approach. A comparison to the experimental data. *J. Nucl. Mater.* 374 pp 286–289.
- 22-63 **Hossain M M, Jonsson M, 2008.** UO₂ oxidation site densities determined by one- and two-electron oxidants, *J. Nucl. Mater.* 373 pp 186–189.
- 22-64 **Hossain M M, Jonsson M, 2008.** Effects of ionic strength on the kinetics of UO₂ oxidation. *J. Nucl. Mater.* 373 pp 190–193.
- 22-65 **Roth O, Hasselberg H, Jonsson M, 2009.** On the impact of reactive solutes on radiation induced oxidative dissolution of UO₂. *J. Nucl. Mater.* 383 pp 231–236.
- 22-66 **Roth O, Jonsson M, 2009.** On the impact of reactive solutes on radiation induced oxidative dissolution of UO₂. *J. Nucl. Mater.* 385 pp 595–600.
- 22-67 **Roth O, Jonsson M, 2008.** Oxidation of UO₂ in aqueous solutions. *Centr. Eur. J. Chem.* 8(1) pp 1–14.
- 22-68 **Jonsson M, Nielsen F, Roth O, Ekeröth E, Nilsson S, Hossain M M, 2007.** Radiation induced spent nuclear fuel dissolution under deep repository conditions, *Environ. Sci. Technol.* 41, pp 7087–7093.
- 22-69 **Rovira M, El Aamrani S, Duro L, Gimenez G, de Pablo J, Bruno J, 2007.** Interaction of uranium with in situ anoxically generated magnetite on steel. *J. Hazard. Mater.* 147 pp 726–731.
- 22-70 **El Aamrani S, Gimenez J, Rovira M, Seco F, Grive M, Bruno J, Duro L, de Pablo J, 2007.** A spectroscopic study of U(VI) interaction with magnetite, *Appl. Surf. Sci.* 253, pp 8794–8797.

- 22-71 **Cui D, Puranen A, Scheidegger A, Leupin O, Gens R, Spahiu K, 2009.** On the speciation of ⁷⁹Se immobilized on iron canister material under simulated deep repository environment. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 282 pp 349–354.
- 22-72 **Puranen A, Jonsson M, Dahn R, Cui D, 2009.** Immobilisation of selenate by iron in aqueous solution under anoxic conditions and the influence of uranyl. *J. Nucl. Mater.* 392 pp 505–509.
- 22-73 **Puranen A, Trummer M, Jonsson M, 2009.** Can redox sensitive nuclides be immobilized on the surface of spent nuclear fuel? – A model study on the reduction of Se(IV)_{aq} on Pd-doped UO₂ under H₂ atmosphere. *J. Nucl. Mater.* 392 pp 505–509.
- 22-74 **Gandia F, Merino J, Bruno J, 2008.** Assessment of the radium-barium co-precipitation and its potential influence on the solubility of Ra in the near field. SKB TR-08-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-75 **Bosbach D, Böttle M, Metz V, 2010.** Experimental study of Ra uptake by barite(BaSO₄). Kinetics of solid solution formation via BaSO₄ dissolution and RaxBa1-xSO₄ reprecipitation. SKB TR-09-XX, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-76 **Ferry C, Piron J P, Poinsot C, 2006.** Evolution of the spent nuclear fuel during the confinement phase in repository conditions: Major outcomes of the French research. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 932, pp 513–520.

Kapitel 23

- 23-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-2 **Andersson H C M, Seitisleam F, Sandström R, 2007.** Creep testing and creep loading experiments on friction stir welds in copper at 75°C. SKB TR-07-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-3 **Andersson-Östling H C M, 2010.** Mechanical properties of welds at creep activation temperatures. Doctoral Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- 23-4 **Sandström R, Wu R, 2007.** Origin of the extra low creep ductility of copper without phosphorus. SKB TR-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-5 **Sandström R, Andersson H C M, 2008.** The effect of phosphorus on creep in copper. *Journal of Nuclear Materials*, 372, 66–75.
- 23-6 **Sandström R, Andersson H C M, 2007.** Creep during power-law breakdown in phosphorus alloyed copper. CREEP8 Conference, San Antonio, Texas, USA, July 22–26, 2007.
- 23-7 **Sandström R, Andersson H C M, 2008.** Creep in phosphorus alloyed copper during power-law breakdown. *Journal of Nuclear Materials* 372, 76–88.
- 23-8 **Jin L-Z, Sandström R, 2008.** Creep of copper canisters in power-law breakdown. *Computational Materials Science*, Volume 43, Issue 3, September 2008, pp 403–416.
- 23-9 **Jin L-Z, Sandström R, 2009.** Non-stationary creep simulation with a modified Armstrong-Frederick relation applied to copper canisters. *Computational Materials Science*, 46, 339–346.
- 23-10 **Jin L-Z, Sandström R, 2009.** Modified Armstrong-Frederick relation for handling back stresses in FEM computations, Proceedings 2nd international ECCC conference. Creep & fracture in high temperature components – design & life assessment issues, Dübendorf, Switzerland, eds Shibli I A, Holdworth S R, 2009, pp 836–847.
- 23-11 **Sandström R, Hallgren J, Burman G, 2009.** Stress strain flow curves for Cu-OFP. SKB R-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-12 **Andersson-Östling H, Sandström R, 2009.** Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. SKB TR-09-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-13 **Martinsson Å, Andersson-Östling H C M, 2009.** Effect of cold work on creep properties of oxygen-free copper. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 1193.
- 23-14 **Wu R, Jin L-Z, Sandström R, 2009.** Influence of multiaxial stresses on creep properties of phosphorus alloyed oxygen free copper, Proceedings of PVP2009, 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic.
- 23-15 **Wu R, Seitislam F, Sandström R, 2009.** Creep properties of phosphorus alloyed oxygen free copper under multiaxial stress state. SKB R-09-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-16 **Smart N, Rance A P, 2009.** Miniature canister corrosion experiment – results of operation to May 2008. SKB TR-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-17 **Brissonneau L, Boquet, J-L, 2003.** Radiation effects on the mechanical properties nad long term aging of spent fuel storage containers. Proceedings of ICEM '03, icem03-4513.
- 23-18 **Brissonneau L, Barbu A, Boquet J-L, 2004.** Radiation effects on the long-term aging of spent fuel storage containers. RAMTRANS, Vol 15, p.121.
- 23-19 **Guinan M W, 2001.** Radiation effects in spent nuclear fuel canisters. SKB TR-01-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-20 **Sandberg N, Korzhayi P, 2009.** Theoretical study of irradiation induced hardening and embrittlement in spent nuclear fuel holders, relevant for the Swedish long-term storage, SKB R-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 23-21 **Wu R, Freeman A J, Olson G B, 1992.** On the electronic basis of the phosphorus intergranular embrittlement of iron. *J. Mater. Res.*, Vol. 7, 2403.
- 23-22 **Smart N R, Rance A P, Werme L O, 2008.** The effect of radiation of the anaerobic corrosion of steel. *Journal of Nuclear Materials*, 379, 97–104.
- 23-23 **Milodowski A E, Cave M R, Kemp S J, Taylor H, Vickers B P, Green K A, Williams C L, Shaw R A, 2009.** Mineralogical investigations of the interaction between iron corrosion products and bentonite from the NF-Pro Experiments (Phase 1), SKB TR-09-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-24 **Milodowski A E, Cave M R, Kemp S J, Taylor H, Green K A, Williams C L, Shaw R A, Gowing C J B, 2009.** Mineralogical investigations of the interaction between iron corrosion products and bentonite from the NF-Pro Experiments (Phase 2). SKB TR-09-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-25 **Hunter F, Bate F, Heath T, Hoch A, 2007.** Geochemical investigation of iron transport into bentonite as steel corrodes. SKB TR-07-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-26 **Smith J, 2007.** The corrosion and electrochemistry of copper in aqueous, anoxic sulphide solutions. PhD-thesis, University of Western Ontario.
- 23-27 **Kvashnina K O, Butorin S M, Modin A, Soroka I, Marcellini M, Nordgren J, Guo J-H, Werme L, 2007.** In situ X-ray absorption study of copper films in ground water solutions, *Chem. Phys. Lett.* 447, 54–57.
- 23-28 **Kvashnina K O, Butorin S M, Modin M, Soroko I, Marcellini M, Guo J-H, Werme L, Nordgren J, 2007.** Changes in electronic structure of copper films in aqueous solutions, *J. Phys.:Condens. Matter* 19, 226002 (13pp).
- 23-29 **Kvashnina K O, Butorin S M, Modin A, Werme L, Nordgren J, Guo J-H, Berger R, 2009.** Electronic structure of complex copper systems probed by resonant inelastic X-ray scattering at CuL3 edge. *Physica B* 404, 3559–3566.
- 23-30 **Pourbaix M, 1974.** Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Second English edition, NACE, Houston, Texas.
- 23-31 **Puigdomench I, Taxén C, 2000.** Thermodynamic data for copper, Implications for the corrosion of copper under repository conditions. SKB TR-00-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-32 **Szakálos P, Hultquist G, Wikmark G, 2007.** Corrosion of copper by water. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 10 (11) C63-C67.
- 23-33 **Hultquist G, Szakálos P, Graham M J, Sproule G I, Wikmark G, 2009.** Detection of hydrogen in corrosion of copper in pure water. In CORROSION'2009, NACE International Houston TX paper No 3884.
- 23-34 **Hultquist G, Szakálos P, Graham M J, Belonoshko A B, Sproule G I, Gråsjö L, Dorogokupets P, Danilov B, Aastrup T, Wikmark G, Chuah G-K, Eriksson J-C, Rosengren A, 2009.** Water Corrodes Copper. *Catal. Lett.* 132, 311.
- 23-35 **Johansson L-G, 2008.** Comment on “Corrosion of Copper by Water”. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11(4), S1-S1.
- 23-36 **Szakálos P, Hultquist G, Wikmark G, 2008.** Response to comment on “Corrosion of copper by water”. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11(4), S2-S2.
- 23-37 **Werme L O, Korzhavyi P A, 2010.** Comment on Hultquist et al. “Water corrodes copper”. *Catal. Letter* 135, 165–166.
- 23-38 **Hultquist G, Szakálos P, Graham M J, Belonshko A B, Rosengren A, 2010.** Reply to Lars O. Werme et al.; “Comment on ‘Water corrodes copper’”. *Catal. Letter* 135, 167–168.
- 23-39 **Korzhavyi P A, Johansson B, 2010.** Thermodynamic properties of copper compounds with oxygen and hydrogen from first principles. SKB TR-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-40 **The Swedish National Council for Nuclear Waste, 2009.** Mechanisms of Copper Corrosion in Aqueous Environments. A report from the Swedish National Council for Nuclear Waste’s scientific workshop, on November 16, 2009. Report 2009:4, The Swedish National Council for Nuclear Waste.
- 23-41 **Gubner R, Andersson U, 2007.** Corrosion resistance of copper canister weld material. SKB TR-07-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-42 **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.
- 23-43 **Yin S, Li D Y, 2005.** Effects of prior cold work on corrosion and corrosive wear of copper in HNO₃ and NaCl solutions. *Materials Science and Engineering A* 394, 266–276.
- 23-44 **Masurat P, Eriksson S, Pedersen, K, 2010.** Evidence of indigenous sulphate-reducing bacteria in commercial Wyoming bentonite MX-80. *Applied Clay Science* 47, 51–57.
- 23-45 **Masurat P, Eriksson S, Pedersen K, 2010.** Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under *in situ* conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste. *Applied Clay Science* 47, 58–64.
- 23-46 **Pedersen K, 2010.** Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulphate-reducing bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 108, 1094–1104.

- 23-47 **Motamedi M, Karnland O, Pedersen K, 1996.** Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite. *FEMS Microbiol Lett* 141, 83–87.
- 23-48 **Pedersen K, Motamedi M, Karnland O, Sandén T, 2000.** Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. *J Appl Microbiol* 89, 1038–1047.
- 23-49 **Pedersen K, Motamedi M, Karnland O, Sandén T, 2000.** Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. *Engineering Geology* 58, 149–161.
- 23-50 **Karnland O, Olsson S, Dueck A, Birgersson M, Nilsson U, Hernan-Håkansson T, Pedersen K, Nilsson S, Eriksen T E, Rosborg B, 2009.** Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel. SKB TR-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-51 **Wersin P, Spahiu K, Bruno J, 1994.** Kinetic modelling of bentonite-canister interaction, Long-term predictions of copper canister corrosion under oxic and anoxic conditions. SKB TR-94-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-52 **Rosborg B, Pan J, Leygraf C, 2005.** Tafel slopes used in monitoring of copper corrosion in a bentonite/groundwater environment. *Corrosion Science*, 47, 3267–3279.
- 23-53 **Rosborg B, Pan J, 2008.** An electrochemical impedance spectroscopy study of copper in a bentonite/saline groundwater environment. *Electrochimica Acta*, 53, 7556–7564.
- 23-54 **Taniguchi N, Kawasaki M, 2008.** Influence of sulfide concentration on the corrosion behavior of pure copper in synthetic seawater. *J. Nucl. Mater.* 379, pp 154–161.
- 23-55 **Ikeda B M, Litke C D, 2004.** Status report for 2003 on stress corrosion cracking of OFP copper in ammonia. Report 06819-REP-01300-10078-R00. Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Toronto, Ontario.
- 23-56 **Ikeda B M, Litke C D, 2007.** Stress corrosion cracking of copper in nitrite/chloride mixtures at elevated temperatures. Report NWMO TR-2007-04, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- 23-57 **Ikeda B M, Litke C D, 2008.** The effect of high chloride concentrations on stress corrosion cracking behaviour of copper. Report NWMO TR-2008-12, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- 23-58 **Litke C D, Ikeda B M, 2006.** The effect of acetate concentration, chloride concentration, and applied current on stress corrosion cracking of OFP copper. Ontario Power Generation Report No: 06819-REP-01300-10005.
- 23-59 **Litke C D, Ikeda B M, 2008.** The stress corrosion cracking behaviour of copper in acetate solutions. Report TR-2008-21, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- 23-60 **Adeloju S B, Duan Y Y, 1994.** Influence of bicarbonate ions on stability of copper oxides nad copper pitting corrosion. *Br. Corr. J.* 29, p. 315.

Kapitel 24

- 24-1 **SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-2 **Pusch, R, 1985.** Buffertar av bentonitbaserade material i siloförvaret. Funktion och utförande. SKB SFR 85-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-3 **SKB, 2006.** Initial state report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-4 **Karnland O, Olsson S, Nilsson U, 2006.** Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-5 **Pusch R, 2003.** Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-6 **Olsson S, Karnland O, 2010.** Characterisation of bentonites from Kutch, India and Milos, Greece – some candidate tunnel backfill materials? SKB R-09-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-7 **Hökmark H, Sundberg J, Lönnqvist M, Hellström G, Kristensson O, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. Version 1.0. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-8 **Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** T-H-M issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23 Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-9 **Kristensson O, Hökmark H, 2007.** Prototype Repository. THM modeling of the bentonite buffer. Canister mid-height 1-D radial models, holes #1 and #3. SKB IPR-07-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-10 **SKB, 2006.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 24-11 **Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-12 **Birgersson M, Börjesson L, Hedström M, Karnland O, Nilsson U, 2009.** Bentonite erosion. Final report from Clay Technology. SKB TR-09-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-13 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR. Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-14 **Åkesson M, Kristensson O, Börjesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010.** THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-15 **Johannesson L-E, Sandén T, Dueck A, Olsson L, 2010.** Characterisation of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF. BACLO PROJECT PHASE 3. SKB R-10-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-16 **Johannesson L-E, Sandén T, Dueck A, 2008.** Deep repository engineered barrier system. Wetting and homogenization processes in backfill materials. Laboratory tests for evaluating modeling parameters. SKB R-08-136, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-17 **Dixon D, Anttila S, Viitanen M, Keto P, 2008.** Tests to determine water uptake behaviour of tunnel backfill. SKB R-08-134, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-18 **Dixon D, Lundin C, Hedin M, Ramqvist G, 2008.** Deep repository – engineered barrier systems. Half scale tests to examine water uptake by bentonite pellets in a block-pellet backfill system. SKB R-08-132, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-19 **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.
- 24-20 **Björkenstam E, 1997.** Utveckling av SFR-bruket. Vattenfall Rapport UC 97:4Ö, Vattenfall Utveckling AB, Betongteknik, Älvkarleby.
- 24-21 **Pusch R, Hökmark H, 1987.** Megaparameterstudie av gastransport genom SFR-buffertar. SKB SFR 87-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-22 **Cuss R J, Harrington J F, Noy D J, 2010.** Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report 2008. SKB TR-10-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-23 **Harrington J F, Horseman S T, 2003.** Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-24 **Sandén T, Börjesson L, Dueck A, Goudarzi R, Lönnqvist M, Nilsson U, Åkesson M, 2008.** Description of buffer tests in 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB 2007. SKB R-08-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-25 **Sandén T, Börjesson L, 2008.** Deep repository engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill. Laboratory tests to understand processes during early water uptake. SKB R-06-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-26 **Sandén T, Börjesson L, Dueck A, Goudarzi R, Lönnqvist M, 2008.** Deep repository-Engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. SKB R-08-135, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-27 **Börjesson L, Sandén T, Fälth B, Åkesson M, Lindgren E, 2005.** Studies of buffers behaviour in KBS-3H design. Work during 2002-2004. SKB R-05-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-28 **Dueck A, 2010.** Thermo-mechanical cementation effects in bentonite investigated by unconfined compression tests. SKB TR-10-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-29 **Börjesson L, Hernelind J, 2009.** Mechanical interaction buffer/backfill. Finite element calculations of the upwards swelling of the buffer against both dry and saturated backfill. SKB R-09-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-30 **M, Karnland O, 2009.** Ion equilibrium between montmorillonite interlayer space and an external solution – Consequences for diffusional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73:1908–1923.
- 24-31 **Neretnieks I, Liu L, Moreno L, 2009.** Mechanisms and models for bentonite erosion. SKB TR-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-32 **Birgersson M, Börjesson L, Hedström M, Karnland O Nilsson U, 2009.** Bentonite erosion. Final report from Clay Technology. SKB TR-09-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-33 **Wersin P, Birgersson M, Olsson S, Karnland O, Snellman M, 2008.** Impact of corrosion-derived iron on the bentonite buffer within the KBS-3H disposal concept – the Olkiluoto site as case study. SKB R-08-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-34 **Karnland O, Olsson S, Dueck A, Birgersson M, Nilsson U, Hernan-Håkansson T, Pedersen K, Nilsson S, Eriksen T E, Rosborg B, 2009.** Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel. SKB TR-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-35 **Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 24-36 **Alexander W R, Arcilla C A, McKinley I G, Kawamura H, Takahashi Y, Aoki K, Miyoshi S, 2008.** A new natural analogue study of the interaction of low-alkali cement leachates and the bentonite buffer. *Sci Basis Nucl Waste Manag.* XXXI, 493–500.
- 24-37 **Cronstrand P, 2007.** Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-38 **Muurinen A, Carlsson T, 2007.** Development of methods for on-line measurements of chemical conditions in compacted bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32: 241–246.
- 24-39 **Liu L, Neretnieks I, 2010.** Interaction between colloidal particles. Literature Review. SKB TR-10-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-40 **Jönsson B, Åkesson T, Bengt Jönsson B, Meehdi S, Janiak J, Reine Wallenberg R, 2009.** Structure and forces in bentonite MX-80. SKB TR 09-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-41 **Dvinskikh S V, Furó I, 2009.** Magnetic resonance imaging and nuclear magnetic resonance investigations of bentonite systems. SKB TR-09-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-42 **Richards T, 2010.** Particle clogging in porous media. Filtration of a smectite solution. SKB TR-10-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-43 **Ochs M, Talerico C, 2004.** Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. SKB TR-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-44 **Holmboe M, 2009.** The Bentonite Barrier: Microstructural Aspects on Colloid Filtration and Radiation Effects on Bentonite Colloid Stability. Licentiate Thesis in Chemistry, KTH, Stockholm Sweden.
- 24-45 **Vahlund F, Hermansson H, 2006.** Compulink. Implementing the COMP23 model in Simulink. SKB R-06-86, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 25

- 25-1 **Hökmark H, Lönnqvist M, Kristensson O, Sundberg J, Hellström G, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 25-2 **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.
- 25-3 **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.
- 25-4 **Sundberg J, Back P-E, Ericsson L O, Wrafter J, 2009.** A method for estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, Elsevier, 2009, 1023–1028.
- 25-5 **Kristensson O, Hökmark H, 2007.** Prototype Repository. THM modeling of the bentonite buffer. Canister mid-height 1-D radial models, holes #1 and #3. SKB IPR-07-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-6 **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.
- 25-7 **Sundberg J, Wrafter J, Back P-E, Rosén L, 2008.** Thermal properties Laxemar. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-8 **Sundberg J, Wrafter J, Ländell M, Back P-E, Rosén L, 2008.** Thermal properties Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the thermal bedrock model, stage 2.2. SKB R-08-65, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 25-9 **Mossmark F, Sundberg J, 2007.** Field measurements of thermal properties. Multi probe measurements in Laxemar. Oskarshamn site investigation. SKB P-07-77, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-10 **Sundberg J, Wrafter J, Mossmark F, Sundberg A, 2008.** Anisotropy of thermal properties in metagranite at Forsmark. Comparison between large-scale field measurements, small-scale field measurements and laboratory measurements. Forsmark site investigation. SKB P-07-194, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-11 **Hökmark H, Sundberg J, Lönnqvist M, Hellström G, Kristensson O, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. Version 1.0. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-12 **Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** T-H-M issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23 Svensk Kärnbränslehantering AB
- 25-13 **Sundberg J, Back P-E, Ländell Märta, Sundberg A, 2009.** Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. SKB TR-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-14 **Follin S, 2008.** Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 25-15 **Follin S, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Marsic N, 2008.** Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.3. SKB R-08-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-16 **Follin S, Johansson P-O, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Marsic N, 2007.** Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-17 **Follin S, Levén J, Hartley L, Jackson P, Joyce S, Roberts D, Swift B, 2007.** Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-18 **Rhén I, Forsmark T, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Swan, D, Gylling B, 2008.** Hydrogeological conceptualisation and parameterisation. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-78, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-19 **Rhén I, Forsmark T, Hartley L, Joyce S, Roberts D, Gylling B, Marsic N, 2009.** Bedrock hydrogeology. Model testing and synthesis. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-91, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-20 **Rhén I, Hartley L, 2009.** Bedrock Hydrogeology Laxemar, Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar SKB R-08-92, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-21 **Svensson U, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling of the excavation and operation periods – SR-Site Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-22 **Vidstrand P, Follin S, Zugec N, 2010.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial conditions – SR-Site Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-23 **Enssle C P, Poppei J, 2010.** Implementation and testing of an improved methodology to simulate resaturation processes with DarcyTools. SKB R-09-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-24 **SKB, 2010.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-25 **Holmén J G, 2007.** SFR inverse modelling Part 2. Uncertainty factors of predicted flow in deposition tunnels and uncertainty in distribution of flow paths from deposition tunnels. SKB R-07-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-26 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-27 **Holmén J G, 2007.** Preliminary groundwater model of an extended tunnel system at SFR. SKB D-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-28 **Odén M, 2009.** Hydrogeological modelling at SFR using DarcyTools. Site description SFR version 0.0. Site investigation SFR. SKB P-08-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-29 **Öhman J, Follin S, 2010.** Site investigation SFR. Hydrogeological modelling of SFR. Data review and parameterisation of model version 0.1, SKB P-09-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-30 **Curtis P, Petersson J, Triumf C-A, Isaksson H, 2010.** Site investigation SFR. Deformation zone modelling. Model version 0.1. SKB P-09-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-31 **Öhman J, 2010.** Site investigation SFR. Hydrogeologic modelling of SFR v 0.1, Influence of the ridge on the flow fields for different target volumes. SKB R-09-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-32 **Ericsson L O, 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.
- 25-33 **Ericsson L O, Brinkhoff P, Gustafson G, Kvartsberg S, 2010.** Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S- tunnels at Äspö HRL. SKB R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-34 **Holmén, J, 2008.** Premodelling of the importance of the location of the upstream hydraulic boundary of a regional flow model of the Laxemar-Simpevarp area. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-35 **Johansson P-O, 2008.** Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. SKB R-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-36 **Werner K, 2009.** Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-37 **Bosson E, Gustafsson L-G, Sassner M, 2008.** Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-38 **Bosson E, Sassner M, Gustafsson L-G, 2009.** Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-39 **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.
- 25-40 **Black J H, Barker J A, Woodman N D, 2007.** An investigation of 'sparse channel networks'. Characteristic behaviours and their causes. SKB R-07-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 25-41 **Frampton A, Cvetkovic V, 2010.** Inference of field scale fracture transmissivities in crystalline rock using flow log measurements. *Water Resources Research*, doi :10.1029/2009WR008367.
- 25-42 **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.
- 25-43 **Andersson C J, 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.
- 25-44 **Backers T, Stephansson O, 2008.** Modelling of Fracture Initiation, Propagation and Creep of a KBS-3V and KBS-3H Repository in Sparsely Fractured Rock with Application to the Design at Forsmark Candidate Site. SKI Report 2008:25. Statens Kärnkraftinspektion.
- 25-45 **Martin D, 2005.** Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB R-05-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-46 **Glamheden R, Fälth B, Jacobsson L, Harrström J, Berglund J, Bergkvist L, 2010.** Counterforce applied to prevent spalling. SKB TR-10-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-47 **Claesson J, Probert T, 1996.** Thermoelastic stress due to a rectangular heat source in a semi-infinite medium. Derivation of an analytical solution. SKB TR-96-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-48 **Probert T, Claesson J, 1997.** Thermoelastic stress due to a rectangular heat source in a semi-infinite medium. Application for the KBS-3 repository. SKB TR-97-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-49 **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.
- 25-50 **Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-51 **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.
- 25-52 **Munier R, 2006.** Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes. SKB R-06-54, Svensk kärnbränslehantering AB.
- 25-53 **Munier R, 2007.** Demonstrating the efficiency of the EFPC criterion by mean of Sensitivity analyses. SKB R-06-115, Svensk kärnbränslehantering AB.
- 25-54 **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.
- 25-55 **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.
- 25-56 **Dehls J, 2006.** Permanent Scatterer InSAR processing:Forsmark. SKB R-06-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-57 **Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-58 **Lönnqvist M, Hökmark H, 2009.** Assessment of Potential for Glacially Induced Hydraulic Jacking at Different Depths. SKB R-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-59 **Munier R, Hökmark H, 2004.** Respect distances:Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-60 **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.
- 25-61 **Glamheden R, Lanaro F, Karlsson J, Lindberg U, Wrafter J, Hakami H, Johansson M, 2008.** Rock mechanics Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the rock mechanics model. SKB R-08-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-62 **Fransson Å, 2009.** Literature survey:relations between stress change, deformation and transmissivity for fractures and deformation zones based on in-situ investigations. SKB-R-09-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-63 **Lönnqvist M, Kristensson O, Fälth B, 2010.** Assessment of a KBS-3 nuclear waste repository as a plane of weakness. SKB- R-10-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-64 **Neretnieks I., Andersson J.C., 2009.** Characterisation of spalling fragments to obtain data for flow and transport in damaged zones. Paper presented at “Sinorock 2009” Congress 19-22 May 2009, Hongkong, Proceedings.
- 25-65 **Hudson J A, Backstrom A, Rutqvist J, Jing L, Backers T, Chijimatsu M, Christiansson R, Feng X T, Kobayashi A, Koyama T, Lee H S, Neretnieks I, Pan P Z, Rinne M, Shen B T, 2009.** Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal, *Environmental Geology*, 57 (6), 1275–1297
- 25-66 **Christiansson R, Ericsson L O, Gustafson G, 2009.** Hydraulic characterisation and conceptual modelling of the Excavation Disturbed Zone (EDZ), 2009. Proceedings from SINOROCK 2009 in Hong Kong, ISRM International Symposium on Rock Mechanics, Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods.

- 25-67 **Olsson M, Markström I, Pettersson A, 2008.** Methodology study for documentation and 3D modelling of blast induced fractures. SKB R-08-90, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-68 **Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-69 **Bäckblom G, 2008.** Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. SKB TR-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-70 **Glamheden R, Hökmark H, 2006.** Creep in jointed rock masses. SKB R-06-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-71 **Damjanac B, Fairhurst C, 2009.** Evidence for a Long-Term Strength Threshold in Crystalline Rock. Itasca Consulting Group, Inc. Report ICG09-2502-1-21, Minneapolis, USA.
- 25-72 **Potyondy D O, 2007.** Simulating Stress Corrosion with a Bonded-Particle Model for Rock. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*,44, 677–691.
- 25-73 **Laaksoharju M, Smellie J, Tullborg E-L, Gimeno M, Hallbeck L, Molinero J, Waber N, 2008.** Bedrock hydrochemistry Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-74 **Laaksoharju M, Smellie J, Tullborg E-L, Wallin B, Drake H, Gascoyne M, Gimeno M, Gurban I, Hallbeck L, Molinero J, Nilsson A-C, Waber N, 2009.** Bedrock hydrogeochemistry Laxemar. Site descriptive model, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-93, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-75 **Gómez J B, Auqué L F, Gimeno M J, 2008.** Sensitivity and uncertainty analysis of mixing and mass balance calculations with standard and PCA-based geochemical codes, *Appl. Geochem.* Vol. 23, pp 1941–1956.
- 25-76 **Laaksoharju M, Gascoyne M, Gurban I, 2008.** Understanding Groundwater Chemistry Using Mixing Models. *Appl. Geochem.* No 23.
- 25-77 **Gimeno M J, Auqué L F, Javier B Gómez J B, Acero P, 2008.** Water-rock interaction modelling and uncertainties of mixing modelling. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-110, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-78 **Gimeno M J, Auqué L F, Javier B Gómez J B, Acero P, 2008.** Water-rock interaction modelling and uncertainties of mixing modelling. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-86, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-79 **Auqué L F, Gimeno M J, Gómez J B, Puigdomenech I, Smellie J, Tullborg E-L, 2006.** Groundwater chemistry over a glacial cycle. Evaluation for SR-Can. SKB TR-06-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-80 **Auqué L F, Gimeno M J, Gómez J B, Puigdomenech I, 2007.** Coupling hydrological and geochemical simulations to assess spatial heterogeneity and chemical evolution of groundwaters at two candidate repository sites in Sweden. In: D. Dunn, C. Poinssot, B. Begg (eds.), *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX. Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 985. Mater. Res. Soc., Warrendale, Penn., pp 519–524.
- 25-81 **Auqué L F, Gimeno M J, Gómez J B, Puigdomenech I, 2007.** A new tool for coupling hydrological and geochemical simulations to assess spatial heterogeneity and chemical evolution of groundwaters. In: T.D. Bullen, Y. Wang (eds.), *Proceedings of the 12th International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI-12, Kunming, China, 31 July–5 August 2007.* Taylor & Francis Group, London, UK, pp 565–569.
- 25-82 **Laaksoharju M, Skårman C, Skårman E, 1999.** Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Appl. Geochem.* Vol. 14, pp 861–872.
- 25-83 **Gómez J B, Laaksoharju M, Skårman E, Gurban I, 2009.** M3 version 3.0:Verification and validation. SKB TR-09-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-84 **Laaksoharju M, Skårman E, Gómez J B, Gurban I, 2009.** M3 User’s Manual. Version 3.0. SKB TR-09-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-85 **Gómez J B, Laaksoharju M, Skårman E, Gurban I, 2006.** M3 version 3.0:Concepts, methods, and mathematical formulation. SKB TR-06-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-86 **Crawford J, 2008.** Bedrock transport properties Forsmark. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. SKB R-08-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-87 **Frampton A, Cvetkovic V, 2009.** Significance of injection modes and heterogeneity on spatial and temporal dispersion of advecting particles in two-dimensional discrete fracture networks. *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2008.07.010.
- 25-88 **Painter S, 2006.** Effect of single-fracture aperture variability on field-scale transport. SKB R-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-89 **Neretnieks I, 2006.** Channeling with diffusion into stagnant water and into a matrix in series. *Water Resour. Res.*, Vol 42, W11418.
- 25-90 **Smellie J A T, Waber H N, Frapé S K (eds), 2003.** Matrix Fluid Chemistry Experiment. Final report (June 1998 – March 2003). SKB TR-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-91 **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

- 25-92 **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.
- 25-93 **Waber H N, Smellie J A T, 2008.** Characterisation of porewater in crystalline rocks. *Appl. Geochem.* 23, 1834-1861.
- 25-94 **Waber H N, Gimmi T, Smellie J A T, 2008.** Porewater chemistry in the rock matrix, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-105, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-95 **Waber H N, Gimmi T, Smellie J A T, deHaller A, 2009.** Porewater in the rock matrix. Site descriptive modelling. SDM-Site Laxemar. SKB R-08-112, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 25-96 **Byegård J, Selnert E, Tullborg E-L, 2008.** Bedrock transport properties. Data evaluation and retardation model. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. SKB R-08-98, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-97 **Selnert E, Byegård J, Widestrand H, Carlsten S, Döse C, Tullborg, E-L, 2009.** Bedrock transport properties. Data evaluation and retardation model. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-100, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-98 **Crawford J, Sidborn M, 2009.** Bedrock transport properties Laxemar. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-99 **Löfgren M, Vecernik P, Havlova V, 2010.** Studying the influence of pore water electrical conductivity on the formation factor, as estimated based on electrical methods. SKB R-09-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-100 **Löfgren M, Neretnieks I, 2006.** Through-electromigration. A new method of investigating pore connectivity and obtaining formation factors. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 87, pp 237–252.
- 25-101 **Tullborg E-L, Drake H, Sandström B, 2008.** Palaeohydrogeology:A methodology based on fracture mineral studies. *Appl. Geochem.*, 23, 1881–1897.
- 25-102 **Drake H, Tullborg E-L, 2009.** Paleohydrogeological events recorded by stable isotopes, fluid inclusions and trace elements in fracture minerals in crystalline rock, Simpevarp area, SE Sweden. *Appl. Geochem.*, 24, 715–732.
- 25-103 **Sandström B, Tullborg E-L, 2009.** Events of fluid migration in the Fennoscandian Shield recorded by stable isotopes, rare earth elements and fluid inclusions in fracture minerals at Forsmark, Sweden. *Chem. Geol.*, 266, 135–151
- 25-104 **Drake H, Tullborg E-L, Page L, 2009.** Distinguished multiple events of fracture mineralisation related to far-field orogenic effects in Paleoproterozoic crystalline rocks, Simpevarp area, SE Sweden. *Lithos* 110, 37– 49.
- 25-105 **Sandström B, Tullborg E-L, Larson S Å, Page L, 2009.** Brittle tectonothermal evolution in the central Fennoscandian Shield as recorded by paragenesis, orientation and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of fracture minerals at Forsmark, Sweden. *Tectonophysics*, 478, 150–174.
- 25-106 **Blyth A R, Frapé S K, Tullborg E-L, 2009.** A review and comparison of fracture mineral investigations and their application to radioactive waste disposal. *Appl. Geochem.*, 24, 821–835.
- 25-107 **Drake H, Tullborg E-L, MacKenzie A B, 2009.** Detecting the near-surface redox front in crystalline bedrock using fracture mineral distribution, geochemistry and U-series disequilibrium. *Appl. Geochem.*, 24, 1023–1039.
- 25-108 **Sandström B, Tullborg E-L, Smellie J, MacKenzie, A B, Suksi J, 2008.** Fracture mineralogy of the Forsmark site, SDM-site Forsmark. SKB R-08-102, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-109 **Dideriksen K, Christiansen B C, Baker J A, Frandsen, C, Balic-Zunic T, Tullborg E-L, Mørup S, Stipp S L S, 2007.** Fe-oxide fracture-fillings as a palæo-temperature and -redox indicator: Structure, crystal form, REE content and Fe isotope composition. *Chem. Geol.* 244, 330–343.
- 25-110 **Sandström B, Annersten H, Tullborg E-L, 2010.** Fracture-related hydrothermal alteration of metagranitic rock and associated changes in mineralogy, geochemistry and degree of oxidation:a case study at Forsmark, central Sweden. *Int. J. Earth Sci.* 99 (1), 1–25.
- 25-111 **Drake H, Tullborg, E-L, Annersten H, 2008.** Red-staining of the wall rock and its influence on the reducing capacity around water conducting fractures. *Appl. Geochem.* 23, 1898–1920.
- 25-112 **Zazzi Å, 2009.** Chlorite:Geochemical properties, dissolution kinetics and Ni(II) sorption. Ph.D. Thesis, Royal Inst. of Technol. (KTH), Stockholm.
- 25-113 **André M, 2009.** New methods for the determination of sorption capacities and sorption-related properties of intact rock. Doktorsavhandling, KTH. KTH TRITA-CHE Report 2009:19, ISBN 978-91-7415-332-3.
- 25-114 **André M, Malmström M E, Neretnieks I, 2008.** Determination of sorption properties of intact rock samples:New methods based on electromigration, *Journal of Contaminant Hydrology* 103, 71–81.
- 25-115 **André M, Malmström M E, Neretnieks I, 2008.** Measuring sorption coefficients and BET surface areas on intact drillcore and crushed granite samples, *Radiochimica Acta* 96, 673–677.
- 25-116 **André M, Malmström M, Neretnieks I, 2009.** Specific surface area determinations on intact drill-cores and evaluation of extrapolation methods for rock matrix surfaces, *J. Contaminant Hydrology*, 110, p 1–8.

- 25-117 **André M, Malmström M E, Neretnieks I.** Rapid surface area determination of crystalline rock using impedance spectroscopy. In: André M, 2009. New methods for the determination of sorption capacities and sorption-related properties of intact rock. Doktorsavhandling, KTH. KTH TRITA-CHE Report 2009:19, ISBN 978-91-7415-332-3.
- 25-118 **Dubois I E, Zazzi Á, Malmström M E, 2009.** Nickel sorption on chlorite:Batch experiments and modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(13) Suppl S:A309.
- 25-119 **Davis J A, Ochs M, Olin M, Tweed C J, 2005.** NEA sorption project Phase II: Interpretation and prediction of radionuclide sorption onto substrates relevant for radioactive waste disposal using thermodynamic sorption models. Nuclear Energy Agency OECD.
- 25-120 **Pedersen K, 2002.** Microbial processes in the disposal of high level radioactive waste 500 m underground in Fennoscandian shield rocks. In "Interactions of microorganisms with radionuclides". Keith-Roach MJ, Livens FR. (eds.). Amsterdam:Elsevier; 2002, pp 279–311.
- 25-121 **Nielsen ME, 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* 2006;4:43–52.
- 25-122 **Anderson C, Pedersen K, Jakobsson A-M, 2006.** Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. *Geomicrobiol J* 2006;23:15–29.
- 25-123 **Anderson C, Jakobsson A-M, Pedersen K, 2006.** Influence of in situ biofilm coverage on the radionuclide adsorption capacity of subsurface granite. *Environ Sci Technol* 2006;41:830–836.
- 25-124 **Charbonneau A, Novakowski K, Ross N, 2006.** The effect of a biofilm on solute diffusion in fractured porous media. *J. Contaminant Hydrol.*, 85:212–228.
- 25-125 **Johnsson A, 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* 2006;23:621–630.
- 25-126 **Hallbeck L, Pedersen K, 2008.** Characterization of microbial processes in deep aquifers of the Fennoscandian Shield. *App Geochem* 2008;23:1796–1819.
- 25-127 **Hallbeck L, Pedersen K, 2008.** Explorative analysis of microbes, colloids and gases together with microbial modelling. Site description model. SDM-Site Laxemar. SKB R-08-109, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-128 **Hallbeck L, Pedersen K, 2008.** Explorative analysis of microbes, colloids and gases. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-85, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-129 **Eydal H S C, Pedersen K, 2007.** Use of an ATP assay to determine viable microbial biomass in Fennoscandian Shield groundwater from depths of 3–1,000 m. *Journal of Microbiological Methods* 70, 363–373.
- 25-130 **Kyle J E, Eydal H S C, Ferris F G, Pedersen K, 2008.** Viruses in granitic groundwater from 69 to 450 m depth of the Äspö hard rock laboratory, Sweden. *The ISME Journal* 2008;2:571–574.
- 25-131 **Eydal H S C, Jägevall S, Hermansson M, Pedersen K, 2009.** Bacteriophage lytic to *Desulfovibrio aespoeensis* isolated from deep groundwater. *The ISME Journal* 2009;3:1139–1147.
- 25-132 **Essén S A, Johnsson A, Bylund D, Pedersen K, Lundström U S, 2007.** Siderophore production by *Pseudomonas stutzeri* under aerobic and anaerobic conditions. *Appl Environ Microbiol* 2007;73:5857–5864.
- 25-133 **Moll H, Glorius M, Bernhard G, Johnsson A, Pedersen K, Schäfer M, Budzikiewicz H, 2008.** Characterization of pyoverdins secreted by a subsurface strain of *Pseudomonas fluorescens* and their interactions with uranium(VI). *Geomicrobiol J* 2008;25:157–166.
- 25-134 **Moll H, Johnsson A, Schäfer M, Pedersen K, Budzikiewicz K, Bernhard G, 2008.** Curium(III) complexation with pyoverdins secreted by a groundwater strain of *Pseudomonas fluorescens*. *Biometals* 2008;21:219–228.
- 25-135 **Yang C, Samper J, Molinero J, Bonilla M, 2007.** Modelling geochemical and microbial consumption of dissolved oxygen after backfilling a high level radioactive waste repository. *J. Contaminant Hydrol.*, 93:130–148.
- 25-136 **Yang C, Samper J, Molinero J, 2008.** Inverse microbial and geochemical reactive transport models in porous media. *Phys. Chem. Earth*, 33:1026–1034.
- 25-137 **Mäder U K, Fierz U, Frieg J, Rüthi M, Albinsson Y, Möri A, Allard S, Stille P, 2006.** Interaction of hyperalkaline fluid with fractured rock:Field and laboratory experiments of the HPF project (Grimsel Test Site, Switzerland), *J. Geochem. Expl.* Vol.90, pp 68–94.
- 25-138 **Soler J M, Mäder U K, 2007.** Mineralogical alteration and associated permeability changes induced by a high-pH plume:Modeling of a granite core infiltration experiment. *Appl. Geochem.*, 22:17–29.
- 25-139 **Andersson M, Ervanne H, Glaus M A, Holgersson S, Karttunen P, Laine H, Lothenbach B, Puigdomenech I, Schwyn B, Snellman M, Ueda H, Vuorio M, Wieland E, Yamamoto T, 2008.** Development of methodology for evaluation of long-term safety aspects of organic cement paste components. POSIVA WR-2008-28, Posiva Oy, Olkiluoto, Eurajoki, Finland.

- 25-140 **Smith P, Neall F, Snellman M, Pastina B, Nordman H, Johnson L, Hjerpe T, 2008.** Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Summary report. SKB R-08-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-141 **Jansson M, 2009.** Bentonite erosion. Laboratory studies. SKB TR-09-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-142 **García-García S, Degueldre C, Wold S, Frick S, 2009.** Determining pseudo-equilibrium of montmorillonite colloids in generation and sedimentation experiments as a function of ionic strength, cationic form, and elevation. *J. Colloid and Interface Sci.* 335, 54–6.
- 25-143 **Holmboe M, 2009.** The Bentonite Barrier: Microstructural Aspects on Colloid Filtration and Radiation Effects on Bentonite Colloid Stability. Licentiate Thesis in Chemistry, KTH, Stockholm.
- 25-144 **Vilks P, Miller N H, Vorauer A, 2008.** Laboratory bentonite colloid migration experiments to support the Äspö Colloid project. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* Vol. 33, pp 1035–1041.
- 25-145 **Vilks P, Miller N H, 2009.** Bentonite and latex colloid migration experiments in a granite fracture on a metre scale to evaluate effects of particle size and flow velocity. NWMO TR-2009-26.
- 25-146 **Cheng H, Cvetkovic V, 2009.** Evaluation of colloid transport experiments in a quarried block. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol.1124, pp 519–524.
- 25-147 **García-García S, 2010.** Generation, stability and migration of montmorillonite colloids in aqueous systems. Doktorsavhandling KTH, TRITA-CHE Report 2010:3, ISSN 1654-1081.
- 25-148 **Degueldre C, Raabe S, Wold S, 2009.** Investigations of clay colloid aggregates by scanning X-ray microspectroscopy of suspensions. *Appl. Geochem.* 24, 2015–2018.
- 25-149 **Haveman S A, Pedersen K, Ruotsalainen P, 1999.** Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. *Geomicrobiol. J.*, 16:277–294.
- 25-150 **Pedersen K, Arlinger J, Hallbeck A, Hallbeck L, Eriksson S, Johansson J, 2008.** Numbers, biomass and cultivable diversity of microbial populations relate to depth and borehole-specific conditions in groundwater from depths of 4 to 450 m in Olkiluoto, Finland, *The ISME Journal*, 2:760–775.
- 25-151 **Mahara Y, Hasegawa T, Miyakawa K, Ohta T, 2008.** Correlation between dissolved ⁴He concentration and ³⁶Cl in groundwater at Äspö, Sweden. *Appl. Geochem.*, 23:3305–3320.
- 25-152 **Gascogne M, 2000.** A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. POSIVA 2000-09, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- 25-153 **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.
- 25-154 **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.
- 25-155 **Stotler R L, Frapé S K, Ruskeeniemi T, Ahonen L, Onstott T C, Hobbs M Y, 2009.** Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin, Nunavut, Canada. *J. Hydrol.*, Vol.373, pp 80–95.
- 25-156 **Holden B, Stotler R L, Frapé S K, Ruskeeniemi T, Talikka M, Freifeld B M, 2009.** High Lake Permafrost Comparison Site: Permafrost Phase IV. Report NWMO TR-2009-11. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Ontario, Canada.
- 25-157 **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 a regional scale, due to a high salinity pulse. SKB R-06-101, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-158 **Fox A, La Pointe P, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-159 **La Pointe Paul, Fox A, Hermanson J, Öhman J, 2008.** Geological discrete fracture network model for the Laxemar site. Site Descriptive Modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-160 **Darcel C, Davy P, Le Goc R, de Dreuzy J R, Bour O, 2009.** Statistical methodology for discrete fracture model – including fracture size, orientation uncertainty together with intensity uncertainty and variability. SKB R-09-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-161 **Srivastava R M, Frykman P, 2006.** Fracture network modelling: verification of procedures and validation using Lägerdorf quarry field data. Ontario Power Generation Report 06819-REP-01200-10122-R00.
- 25-162 **Munier R, 1993.** Segmentation, fragmentation and jostling of the Baltic shield with time. Institute of Earth Sciences, Mineralogy-Petrology., Uppsala University. Uppsala, Sweden.
- 25-163 **Lan H, Martin CD, Hu Bo, 2010.** Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behaviour during compression testing. *Journal of Geophysical Research* 115, B01202, doi:10.1029/2009JB006496.
- 25-164 **Hunter F M I, Hartley L J, Hoch A, Jackson C P, McCarthy R, Marsic N, Gylling B, 2008.** Calibration of regional palaeohydrogeology and sensitivity analysis using hydrochemistry data in site investigations, *Appl. Geochem.*, Vol. 23, pp 1982–2003.

- 25-165 **Grandia F, Sena C, Arcos D, Molinero J, Duro L, Bruno J, 2007.** Quantitative assessment of radionuclide retention in the near-surface system at Forsmark. Development of a reactive transport model using Forsmark 1.2 data. SKB R-07-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-166 **Sena C, Grandia F, Arcos D, Molinero J, Duro L, 2008.** Complementary modelling of radionuclide retention in the near-surface system at Forsmark. Development of a reactive transport model using Forsmark 1.2 data. SKB R-08-107, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-167 **De Simoni M, Carrera J, Sanchez-Vila X, Guadagnini A, 2005.** A procedure for the solution of multi-component reactive transport problems” *Water Resources Research*, 41, 11410.
- 25-168 **Sánchez-Vila X, Dentz M, Donado L, 2007.** Transport controlled reaction rates under local non-equilibrium conditions, *Geophysical Research Letters*, 34, L10404.
- 25-169 **Fernández-García D, Sánchez-Vila X, Guadagnini A, 2008.** Reaction rates and effective parameters in stratified aquifers, *Advances in Water Resources*, 31, 1364–1376.
- 25-170 **Laaksoharju M, Smellie J, Tullborg E-L, Gimeno M, Molinero J, Gurban I, Hallbeck L, 2008.** Hydrogeochemical evaluation and modelling performed within the site investigation program in Sweden. *Applied geochemistry*. 23, 1761–1795.
- 25-171 **Molinero J, Raposo J, Galíndez J M, Arcos D, Guimerá J, 2008.** Coupled hydro-geological and reactive transport modelling of the Simpevarp area (Sweden). *Applied Geochemistry*. 23, 1957–1981.
- 25-172 **Gustafson G, Gylling B, Selroos J-O, 2009.** The Äspö Task Force on groundwater flow and transport of solutes: bridging the gap between site characterization and performance assessment for radioactive waste disposal in fractured rocks, *Hydrogeology Journal*, vol 17 (5), 1031–1033.
- 25-173 **Hodgkinson D, Benabderrahmane H, Elert M, Hautjärvi A, Selroos J-O, Tanaka Y, Uchida M, 2009.** An overview of Task 6 of the Äspö Task Force: modelling groundwater and solute transport: improved understanding of radionuclide transport in fractured rock, *Hydrogeology Journal*, vol 17 (5), 1035–1049.
- 25-174 **Moreno L, Crawford J, 2009.** Can we use tracer tests to obtain data for performance assessment of repositories for nuclear waste? *Hydrogeology Journal* vol 17 (5), 1067–1080.
- 25-175 **Löfgren M, Crawford J, Elert M, 2007.** Tracer tests – possibilities and limitations. Experience from SKB fieldwork: 1977–2007. SKB R-07-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-176 **Painter S, Mancillas J, 2009.** MARFA version 3.2.2 user’s manual: migration analysis of radionuclides in the far field. SKB R-09-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-177 **Painter S, Cvetkovic V, Mancillas J, Pensado O, 2008.** Time domain particle tracking methods for simulating transport with retention and first-order transformation. *Water Resour. Res.*, 44, W01406, doi:10.1029/2007WR005944.
- 25-178 **Frampton A, Cvetkovic V, 2007.** Upscaling particle transport in discrete fracture networks:1. Nonreactive tracers, *Water Resour. Res.*, vol 43, W10428, doi:10.1029/2006WR005334.
- 25-179 **Frampton A, Cvetkovic V, 2007.** Upscaling particle transport in discrete fracture networks:2. Reactive tracers, *Water Resources Research*, 43, W10429, doi:10.1029/2006WR005336.
- 25-180 **Nordqvist R, 2008.** Evaluation and modelling of SWIW tests performed within the SKB site characterisation programme. SKB R-08-104, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-181 **Widestrand H, Byegård J, Cvetkovic V, Tullborg E-L, Winberg A, Andersson P, Siitari-Kauppi M, 2007.** Sorbing tracer experiments in a crystalline rock fracture at Äspö (Sweden):1. Experimental setup and microscale characterization of retention properties, *Water Resources Research*, 43, W10413, doi:10.1029/2006WR005277.
- 25-182 **Cvetkovic V, Cheng H, Widestrand H, Byegård J, Winberg A, Andersson P, 2007.** Sorbing tracer experiments in a crystalline rock fracture at Äspö (Sweden):2. Transport model and effective parameter estimation, *Water Resources Research*, 43, W11421, doi:10.1029/2006WR005278.
- 25-183 **Cvetkovic V, Cheng H, 2008.** Sorbing tracer experiments in a crystalline rock fracture at Äspö (Sweden):3. Effect of micro-scale heterogeneity, *Water Resources Research*, 44, W12447, doi:10.1029/2007WR006797.
- 25-184 **Cvetkovic V, Cheng H, Byegard J, Winberg A, Tullborg E-L, Widestrand H, 2010.** Transport and retention from single to multiple fractures in crystalline rock at Äspö (Sweden):1. Evaluation of tracer test results and sensitivity analysis, *Water Resour. Res.*, 46, W05505, doi:10.1029/2009WR008013.
- 25-185 **Cvetkovic V, Frampton A, 2010.** Transport and retention from single to multiple fractures in crystalline rock at Aspo (Sweden):2. Fracture network simulations and generic retention model, *Water Resour. Res.*, 46, W05506, doi:10.1029/2009WR008030.
- 25-186 **Cvetkovic V, 2010.** Significance of fracture rim zone heterogeneity for tracer transport in crystalline rock, *Water Resources Research*, vol 46, W03504, doi:10.1029/2009WR007755.
- 25-187 **Nordqvist R, Byegård J, Hjerne C, 2008.** Feasibility study of a Single Well Injection Withdrawal (SWIW) experiment with synthetic groundwater. SKB R-08-125, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 26

- 26-1 **SKB, 2007.** Forsmark site investigation. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 26-2 **SKI, 2008.** SKI's and SSI's gemensamma granskning av SKB:s säkerhetsrapport SR-Can. SKI Rapport 2008:19, SSI Rapport 2008:04.
- 26-3 **Lindborg T (ed), 2008.** Surface system Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-4 **Söderbäck B, Lindborg T, 2009.** Surface system Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-5 **Hudson J A, 1992.** Rock Engineering Systems: Theory and Practice, London, Ellis Horwood.
- 26-6 **Kautsky U, 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area. SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-7 **Nordén S, Söderbäck B, Andersson E, 2008.** The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site. SKB R-08-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-8 **Wijnblad E, Aquilonius K, Floderus S, 2008.** The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling SDM-Site. SKB R-08-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-9 **Löfgren A (ed), 2008.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling SDM-Site. SKB R-08-01, Kärnbränslehantering AB.
- 26-10 **Tagesson T, Lindroth A, 2007.** High soil carbon efflux rates in several ecosystems in southern Sweden. Boreal Environment Research 12:65-80.
- 26-11 **Tagesson T, 2007.** Soil carbon effluxes in ecosystems of Forsmark and Simpevarp. SKB TR-07-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-12 **Mjöfors K, Johansson M B, Nilsson Å, Hyvönen R, 2007.** Input and turnover of forest tree litter in the Forsmark and Oskarshamn areas. SKB R-07-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-13 **Persson H, Stadenberg I, 2007.** Distribution of fine roots in forest areas close to the Swedish Forsmark and Oskarshamn nuclear power plants. SKB R-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-14 **Persson H, Stadenberg I, 2007.** Growth dynamics of fine roots in a coniferous forest site close to Forsmark in the central part of Sweden. SKB TR-07-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-15 **Persson H., Stadenberg I, 2008.** Spatial distribution of fine-roots in boreal forests in Eastern Sweden. Plant and Soil 318:1-14.
- 26-16 **Persson H, Stadenberg I, 2009.** Fine root dynamics in a Norway spruce forest (*Picea abies* (L.) Karst) in eastern Sweden. Plant and Soil, DOI 10.1007/s11104-009-0206-8.
- 26-17 **Tagesson T, Eklundh L, Lindroth A, 2009.** Applicability of leaf area index products for boreal regions of Sweden. International Journal of Remote Sensing 30:5619-5632.
- 26-18 **Tagesson T, Smith B, Löfgren A, Rammig A, Eklundh L, Lindroth A, 2009.** Estimating Net Primary Production of Swedish Forest Landscapes by Combining Mechanistic Modeling and Remote Sensing. *Ambio* 38:6.
- 26-19 **Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J-O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000-year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-20 **Truvé J, 2007.** Surveys of mammal populations in the areas adjacent to Forsmark and Oskarshamn. Results from 2007, compared with results from 2002/2003. Oskarshamn and Forsmark site investigation. SKB P-07-122, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-21 **Green M, 2008.** Bird monitoring in Forsmark 2008. Forsmark site investigation. SKB P-08-84, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-22 **Green M, 2008.** Bird monitoring in Simpevarp 2002-2008. Oskarshamn site investigations. SKB P-08-89, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-23 **Cederlund G, 2009.** Älgstammens ålderssammansättning och reproduktion i Forsmark. Platsundersökning Forsmark. SKB P-09-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-24 **Cederlund G, 2009.** Älgstammens ålderssammansättning och reproduktion i Saxmarken-Hållnäs. Platsundersökning Forsmark. SKB P-09-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-25 **Cederlund G, 2009.** Älgstammens ålderssammansättning och reproduktion i Oskarshamn. Platsundersökning. SKB P-09-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-26 **Persson T, Lenoir L, Taylor A, 2007.** Bioturbation in different ecosystems at Forsmark and Oskarshamn. SKB R-06-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-27 **Brun C, 2008.** Major and trace elements in boreal forests – litter decomposition, plant-soil chemistry and aspects of pollution. Doctoral thesis at the School of Pure and Applied Natural Sciences, University of Kalmar. ISBN 978-91-89584-99-0.
- 26-28 **Löfgren A, Kautsky U, 2008.** Estimates of naturally occurring pools of thorium, uranium and iodine in boreal forests of southeast Sweden. In Vetikko V, et al. (ed.). Proceedings of the NKS-B FOREST Seminar, Helsinki, 7–8 October 2008.
- 26-29 **Löfgren A, Kautsky U, Lindborg T, 2008.** Estimates of naturally occurring pools of thorium, uranium and iodine in ecosystems of the boreal region in Sweden. Poster at the International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ECORAD), 15–20 June, Bergen, Norway.

- 26-30 **Gärdenäs A, Eckersten H, Reinlert A, Gustafsson D, Jansson P-E, Ekström P-A, Avila R, Greger M, 2009.** Tracey – a simulation model of trace element fluxes in soil-plant system for long-term assessment of a radioactive groundwater contamination. SKB TR-09-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-31 **Engdahl A, Råden R, Borgiel M, Omberg L-G, 2008.** Chemical composition of suspended material, sediment and pore water in lakes and sea bays Oskarshamn and Forsmark site investigation. SKB P-08-81, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-32 **Wijnbladh E, Plantman P, 2007.** Validation of marine benthic vegetation models. Random sampling in shallow marine areas. Oskarshamn site investigation. SKB P-07-231, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-33 **Engqvist A, Andrejev O, 2008.** Validation of coastal oceanography at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB TR-08-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-34 **Lessin G, Lipps I, Raudsepp U, 2007.** Modelling nitrogen and phosphorus limitation on phytoplankton growth in Narva Bay, south-eastern Gulf of Finland. *Oceanologia* 49: 259–276.
- 26-35 **Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Models for transport and fate of carbon, nutrients and point source released radionuclides to an aquatic ecosystem. SKB TR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-36 **Thulin B, Hahn H J, 2008.** Ecology and living conditions of groundwater fauna. SKB TR-08-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-37 **Stein H, Kellermann C I, Schmidt S I, Brielmann H, Steube C, Fuchs A, Hahn H J, Berkhoff S E, Thulin B, Griebler C, 2009.** (2010, Epub 2009): The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater ecosystems. *Journal of Ecological Monitoring*. Vol.12(1):242–54.
- 26-38 **Lundqvist B, 2009.** Vattnet är fullt med okända djur. SKB Lagerbladet Oskarshamn, 2009, 1, sida 11.
- 26-39 **Thulin B, 2009.** Små djur i grundvattnet – en del av ett underjordiskt ekosystem. *FORSKNING*, nr. 1, 29, 31–32.
- 26-40 **Lundqvist B, Thulin B, 2009.** Är det viktigt att ha koll på smådjuren i vattnet? *Geologiskt Forum*, 61, 16-19. Länk <http://www.geologiskaforeningen.nu/geof6.html/>.
- 26-41 **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.
- 26-42 **Tröjbom M, Söderbäck B, Johansson P-O, 2007.** Hydrochemistry in surface water and shallow groundwater. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-07-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-43 **Tröjbom M, Söderbäck B, Kalinowski B, 2008.** Hydrochemistry of surface water and shallow groundwater. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-44 **Hannu S, Karlsson S, 2006.** Chemical characterisation of deposits and biota. Forsmark site investigation. SKB P-06-220, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-45 **Engdahl A, Ternsell A, Hannu S, 2006.** Chemical characterisation of deposits and biota. Oskarshamn site investigation. SKB P-06-320, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-46 **Roos P, Engdahl A, Karlsson S, 2007.** Analysis of radioisotopes in environmental samples. Oskarshamn and Forsmark site investigations. SKB P-07-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-47 **Grolander S, 2010.** Analysis of radioactive isotopes in near surface groundwater, surface water, biota and soil. Forsmark site investigation. SKB P-09-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-48 **Kumblad L, Bradshaw C, 2008.** Element composition of biota, water and sediment in the Forsmark area, Baltic Sea. Concentrations, bioconcentration factors and partitioning coefficients (K_d) of 48 elements. SKB TR-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-49 **Sheppard S, Long J, Sanipelli B, Sohlenius G, 2009.** Solid/Liquid partitioning coefficients (K_d) for selected soils and sediments at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB R-09-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-50 **Karlsson S, Bergström U, 2002.** Nuclide documentation. Element specific parameter values used in the biospheric models of the safety assessments SR 97 and SAFE. SKB R-02-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-51 **IAEA, 2010.** Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Report Series No 472. ISBN 978-92-0-113009-9.
- 26-52 **Holgersson S, 2009.** Oskarshamn site investigation. Batch experiments of I, Cs, Sr, Ni, Eu, U and Np sorption onto soil from the Laxemar area. SKB P-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-53 **Lundin L, Snäll S, Jonsson E, Hannu S, Selnert E, Engdahl A, 2007.** Oskarshamn site investigation. Characterization of soil samples from three valleys in the Laxemar area. SKB P-07-222, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-54 **Morosini M, Jenkins C, Simson S, Albrecht J, Zetterlund M, 2007.** Oskarshamn site investigation. Hydrogeological characterization of deepest valley soil aquifers and soil-rock transition zone at Laxemar, 2006. Subarea Laxemar. SKB P-07-91, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 26-55 **Grandia F, Sena C, Arcos D, Molinero J, Duro L, Bruno J, 2007.** Quantitative assessment of radionuclide retention in the near-surface system at Forsmark. Development of a reactive transport model using Forsmark 1.2 data. SKB R-07-64, Svensk Kärnbränslehantering AB. /25-167/
- 26-56 **Sena C, Grandia F, Arcos D, Molinero J, Duro L, 2008.** Complementary modelling of radionuclide retention in the near-surface system at Forsmark. Development of a reactive transport model using Forsmark 1.2 data. SKB R-08-107, Svensk Kärnbränslehantering AB. /25-168/
- 26-57 **Sena C, Molinero J, Grandia F, Arcos D, Duro L, 2008.** Quantitative assessment of radionuclide migration through Quaternary deposits of Sweden by using groundwater flow and reactive solute transport models. In Proceedings from the International Association of Hydraulic Research (IAHR), International Groundwater Symposium, Jun. 18–20, 2008, Istanbul, Turkey.
- 26-58 **Grandia F, Sena C, Arcos D, Molinero J, Duro L, Bruno J, 2009.** Modelling the radionuclide transfer from bedrock to surface systems at Forsmark site (Sweden). Radioprotection 44, 333–338. (doi:10.1051/radiopro/20095065).
- 26-59 **Avila R, 2006.** Model of the long-term transfer of radionuclides in forests. SKB TR-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-60 **Werner K, Bosson E, Berglund S, 2007.** Flow and radionuclide transport from rock to surface systems: Characterization and modelling of potential repository sites in Sweden. In Proceedings from the 11th Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2007), Sep. 2–6, 2007, Bruges, Belgium, organized by ASME (American Society for Mechanical Engineers).
- 26-61 **Bosson E, Werner K, Berglund S, Lindborg T, 2008.** Modelling solute transport from rock to surface ecosystems in the safety assessment of a repository for spent nuclear fuel. In: Proc. Int. Conf. on Radioecology & Environmental Radioactivity, Jun. 15–20, 2008, Bergen, Norway. Proc. Part 2, 346–349.
- 26-62 **Berglund S, Kautsky U, Lindborg T, Selroos J-O, 2009.** Integration of hydrological and ecological modelling for the assessment of a nuclear waste repository. Hydrogeology Journal 17:95–113.
- 26-63 **Johansson P-O, 2008.** Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-64 **Johansson P-O, Öhman J, 2008.** Presentation of meteorological, hydrological and hydrogeological monitoring data from Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-65 **Bosson E, Gustafsson L-G, Sassner M, 2008.** Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-66 **Gustafsson L-G, Sassner M, Bosson E, 2008.** Numerical modelling of solute transport at Forsmark with MIKE SHE. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-106, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-67 **Werner K, 2009.** Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-68 **Werner K, Öhman J, Holgersson B, Rönnback K, Marelus F, 2008.** Meteorological, hydrological and hydrogeological monitoring data and near-surface hydrogeological properties data from Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-69 **Bosson E, Sassner M, Gustafsson L-G, 2009.** Numerical modelling of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-70 **Gustafsson L-G, Gustafsson A-M, Aneljung M, Sabel U, 2009.** Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Forsmark. Results of modelling with MIKE SHE. SKB R-08-121, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-71 **Mårtensson E, Gustafsson L-G, Bosson E, 2009.** Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Laxemar. Results of modelling with MIKE SHE. SKB R-09-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-72 **Lidman, F, 2009.** Radionuclide profile from Klarebäcksmossen (PSM006562) analysed by gamma spectrometry and ICP-AES. SKB TR-06-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-73 **Juston J, Seibert J, Johansson P-O, 2009.** Temporal sampling strategies and uncertainty in calibrating a conceptual hydrological model for a small boreal catchment. Hydrological Processes 23, 3093-3109.
- 26-74 **Jarsjö J, Destouni G, Persson K, Prieto C, 2007.** Solute transport in coupled inland-coastal water systems. General conceptualisation and application to Forsmark. SKB R-07-65, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-75 **Jarsjö J, Shibuo Y, Destouni G, 2008.** Spatial distribution of unmonitored inland water discharges to the sea. Journal of Hydrology 348, 59–72. oi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.052).

- 26-76 **Darracq A, Destouni G, Persson K, Prieto C, Jarsjö J, 2010.** Quantification of advective solute travel times and mass transport through hydrological catchments. *Environmental Fluid Mechanics* 10, 103–120. (doi:10.1007/s10652-009-9147-2).
- 26-77 **Persson K, Destouni G, 2009.** Propagation of water pollution uncertainty and risk from the subsurface to the surface water system of a catchment. *Journal of Hydrology* 377, 434-444. (doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.001).
- 26-78 **Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 2001.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-79 **Strömgren M, Brydsten L, 2008.** Digital elevation models of Forsmark. Site descriptive modelling. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-80 **Pässe T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-81 **Whitehouse P, 2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. SKB TR-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-82 **Söderbäck B (ed), 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas.
- 26-83 **SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-84 **SKB, 2009.** Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. SKB TR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-85 **Bergström U, Avila R, Ekström P-A, de la Cruz I, 2008.** Dose assessments for SFR 1. SKB R-08-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-86 **SSM, 2009.** Beslut rörande säkerhetsredovisningen för SFR-1. SSM dnr 2008/981, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- 26-87 **Strömgren M, Brydsten L, 2008.** Digital elevation models of Laxemar-Simpevarp. SDM-Site Laxemar. SKB R-08-63, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-88 **Hedenström A, Sohlenius G, Strömgren M, Brydsten L, 2008.** Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-89 **Nyman H, Sohlenius G, Strömgren M, Brydsten L, 2008.** Depth and stratigraphy of regolith. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-90 **Hedenström A, Sohlenius G, 2008.** Description of the regolith at Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-91 **Sohlenius G, Hedenström A, 2008.** Description of regolith at Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-92 **Brydsten L, 2009.** Sediment dynamics in the coastal areas of Forsmark and Laxemar during an interglacial. SKB TR-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-93 **SKB, 2008.** Säkerhetsredovisning SFR 1, Allmän del 2 – Långsiktig säkerhet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-94 **SKB, 2006.** The biosphere at Forsmark. Data assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R-06-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-95 **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.
- 26-96 **Avila R, Pröhl G, 2008.** Models used in the SFR 1 SAR-08 and KBS-3H safety assessments for calculation of 14C doses. SKB R-08-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 26-97 **Erica, 2008.** Länk <http://www.ericaproject.org/> downloaded 2008-04-14.
- 26-98 **Beresford N A, Brown J, Copplestone D, Garnier-Laplace J, Howard B, Larsson C M, Oughton D, Pröhl G, Zinger I (ed), 2007.** An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. EC project contract N° FI6R-CT-2004-508847.
- 26-99 **Bradshaw C, Kumblad L, Wijnbladh E, Kautsky U, Aquilonius K, 2008.** Distribution and Transfer of Elements in a Coastal Baltic Ecosystem – A Stoichiometric Approach. ECORAD 15–20 June, Bergen, Norway.
- 26-100 **Kautsky U, Wijnbladh E, Jönsson B, Kumblad L, 2008.** Simulation of uptake of radionuclides in biota instead of using bio-concentration factors applied for marine ecosystems of the Baltic Sea. ECORAD 15–20 June 2008, Bergen, Norway, Bergen.
- 26-101 **Stark K, Löfgren A, 2008.** Wetland ecosystems in a site description for a nuclear fuel repository. ECORAD 15–20 June 2008, Bergen, Norway.
- 26-102 **Lindborg T, Kautsky U, Brydsten L, 2007.** Landscape modeling for dose calculations in the safety assessment of a repository for spent nuclear fuel. ICM07-7115. Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICM2007. September 2–6, 2007, Oud Sint-Jan Hospital Conference Center, Bruges, Belgium.

- 26-103 **Thulin B, Hahn H J, 2008.** Ecologically Based Assessment of Surface Water Impact on Groundwater. Proceedings from the 33rd International Geological Congress, Oslo, August 7th 2008.
- 26-104 **Bosson E, Sassner M, Gustafsson L-G, 2008.** Hydrological modelling of potential repository sites for spent nuclear fuel in Sweden. 2nd European MIKE by DHI Software Conference, Dubrovnik, Croatia, 13–15 October 2008.
- 26-105 **Bosson E, 2007.** The use of GIS in geohydrological modelling of sites investigated for location of a deep repository for nuclear waste. ESRI-konferensen 28:e september 2007, Stockholm.
- 26-106 **Kumblad L, Söderbäck B, Löfgren A, Lindborg T, Wijnbladh E, Bradshaw C, Kautsky, U, 2007.** Pools and fluxes of organic matter in a boreal landscape - implications for a safety assessment of a repository for nuclear waste. Poster at the 25th Oikos meeting, February 5–7 2007, Stockholms University, Sweden.
- 26-107 **Destouni G, Shibuo Y, Jarsjö J, 2008.** Freshwater flows to the sea: Spatial variability, statistics and scale dependence along coastlines. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L18401, doi:10.1029/2008GL035064.
- 26-108 **Destouni G, Hannerz F, Prieto C, Jarsjö J, Shibuo Y, 2008.** Small unmonitored near-coastal catchment areas yielding large mass loading to the sea, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB4003, doi:10.1029/2008GB003287.
- 26-109 **Rönneck P, 2007.** Major and trace elements in surface and ground waters in two near-coastal granitoidic settings in eastern Sweden. Doctoral thesis at the School of Pure and Applied Natural Sciences, University of Kalmar, Sweden. ISBN 978-91-89584-83-9.
- 26-110 **Åström M, Peltola P, Virtasalo J, Kotilainen A, Salminen, 2008.** Niobium in boreal stream waters and brackish-water sediments. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analyses* 8:1–10.
- 26-111 **Åström M, Peltola P, Rönneck P, Lavergren U, Bergbäck B, Tarvainen T, Backman B, Salminen R, 2009.** Uranium in surface and ground waters in Boreal Europe. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 9:51–62.
- 26-112 **Rönneck P, Åström M, 2007.** Hydrochemical patterns of a small lake and a stream in an uplifting area proposed as a repository site for spent nuclear fuel, Forsmark, Sweden. *Journal of Hydrology* 344:223–235.
- 26-113 **Peltola P, Brun C, Åström M, Tomilina O, 2008.** High K/Rb ratios in stream waters – Exploring plant litter decay, ground water and lithology as potential controlling mechanisms. *Chemical Geology* Vol 257:92–100.
- 26-114 **Augustsson A, Bergbäck B, Åström M, 2009.** Trace metals in recharge and discharge ground waters at two sites at the Baltic coast of Sweden. *Applied Geochemistry* 24:1640–1652.
- 26-115 **Sena C, 2009.** Numerical modelling of radionuclide migration in near-surface systems. Ph. D. thesis, Departamento de Geociencias, Universidade de Aveiro, Portugal.

Kapitel 27

- 27-1 **Blomgren J (ed), Karlsson F, Pomp S, Aneheim E, Ekberg C, Fermvik A, Skarnemark G, Wallenius J, Zakova J, Grenthe I, Szabó Z, 2007.** Partitioning and transmutation. Current developments – 2010. A report from the Swedish reference group for P&T research. SKB TR-10-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-2 **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.
- 27-3 **Arzhanov V, Dufek J, Jolkkonen M, Lagerstedt Ch, Persson C, Sandberg N, Wallenius J, Westlén D, 2007.** System and safety studies of accelerator driven systems for transmutation. Annual report 2006. SKB R-07-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-4 **Blomgren J, Andersson P, Bevilacqua R, Nilsson L, Pomp S, Simutkin V, Öhrn A, Österlund M, 2008.** Neutron data experiments for transmutation. Annual report 2006/2007. SKB R-08-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-5 **Aneheim E, Ekberg Ch, Englund S, Fermvik A, Foreman M, Liljezin J-O, Retegan T, Skarnemark G, Wald K, 2008.** Partitioning and transmutation. Annual report 2007. SKB R-08-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-6 **Arzhanov V, Fokau A, Persson C, Runevall O, Sandberg N, Tesinsky M, Wallenius J, Zhang Y, 2008.** System and safety studies of accelerator driven systems for transmutation. Annual report 2007. SKB R-08-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-7 **Blomgren J, al-Adili A, Andersson P, Bevilacqua R, Nilsson L, Pomp S, Simutkin V, Öhrn A, Österlund M, 2008.** Neutron data experiments for transmutation. Annual report 2007/2008. SKB R-08-96, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-8 **Aneheim E, Ekberg Ch, Fermvik A, Foreman M, Nästrén C, Retegan T, Skarnemark G, 2009.** Partitioning and transmutation. Annual report 2008. SKB R-09-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 27-9 **Arzhanov V, Berglöf C, Fokau A, Jolkkonen M, Runevall O, Sandberg N, Tesinsky M, Wallenius J, Zhang Y, 2009.** System and safety studies of accelerator driven systems for transmutation. Annual report 2008. SKB R-09-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-10 **Aneheim E, Ekberg Ch, Fermvik A, Foreman M, Löfström-Engdahl E, Retegan T, Skarnemark G, Špendlíková I, 2010.** Partitioning and transmutation. Annual report 2009. SKB R-10-MN, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-11 **Ågren O, Moiseenko V E, Noack K, 2008.** On fusion driven systems (FDS) for transmutation. SKB R-08-126, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-12 **SNETP, 2009.** Strategic research agenda, May 2009: executive summary.[Online]. Available at: <http://www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf>.
- 27-13 **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.
- 27-14 **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.
- 27-15 **SKB, 2007.** Komplettering av Fud-program 2007. Loma-programmet och alternativa slutförvaringsmetoder. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 27-16 **Beswick J, 2008.** Status of technology for deep borehole disposal. EPS International Contract No NP 01185. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.
- 27-17 **Baldwin T, Chapman N, Neall F, 2008.** Geological Disposal Options for High-Level Waste and Spent Fuel. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.
- 27-18 **Jackson D, Dormuth K, 2008.** Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation and Alternative Waste Management Technology – Annual Report 2008. NWMO TR-2008-22, Nuclear Waste Management Organization.
- 27-19 **Brady P, Arnold B, Freeze G, Swift P, Bauer S, Kanney J, Rechard R, Stein J, 2009.** Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories.

Del V

Kapitel 28

- 28-1 **SKB, 1997.** Långsiktig förvaring av Sveriges använda kärnbränsle. SKB:s perspektiv på beslutsprocessen. SKB R-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-2 **Fredriksson C, Gramner C, 1998.** Förstudie Oskarshamn. Omvärldsanalys för Oskarshamn. SKB R-98-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 28-3 **Lidskog R (ed), 1998.** Kommunen och kärnavfallet. Svensk kärnavfallspolitik på 1990-talet. ISBN 91-7203-250-2.
- 28-4 **Kärnavfallsrådet, 2010.** Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2010. (SOU 2010:6). Kärnavfallsrådet.
- 28-5 **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.
- 28-6 **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.
- 28-7 **Kasam, 2007.** Riskperspektiv på slutförvaring av kärnavfall – individ, samhälle och kommunikation. En fördjupning till Kasam:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007 (SOU 2007:38). Statens råd för kärnavfallsfrågor. Rapport 2007:4. Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- 28-8 **Kasam, 2007.** Strålade forskningsutsikter. En översikt om kärnavfallsfrågor inom samhällsvetenskaplig forskning. Rapport 2007:5.
- 28-9 **Kärnavfallsrådet, 2008.** Deltagande och demokrati i kärnavfallsfrågan. Rapport 2003:3.
- 28-10 **SKB, 2009.** Samhällsforskningen 2004–2009. Teman, resultat och reflektioner. Svensk Kärnbränslehantering AB. ISBN 978-91-977862-7-0.

Kapitel 29

- 29-1 **SKB, 2009.** Samhällsforskningen 2004–2009. Teman, resultat och reflektioner. Svensk Kärnbränslehantering AB. ISBN 978-91-977862-7-0.

Kapitel 30

- 30-1 **Kaijser A, Högselius P, 2008.** Resurs eller avfall? Politiken kring hanteringen av använt kärnbränsle i Finland, Tyskland, Ryssland och Japan. SKB R-07-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 30-2 **Keskitalo C, Nordlund A, Lindgren M, 2009.** Grunden för beslut i kärnavfallsfrågan – Upplevelser av lagstiftningsgrund och MKB-process. SKB R-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 31

- 31-1 **Pettersson T, 2008.** Unga sjunga med de gamla! – En jämförande analys av grundläggande värderingar och uppfattningar om demokrati och politik bland unga vuxna från 24 länder. SKB R-08-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 31-2 **Sandberg M, 2008.** Ungdomars syn på kärnkraft och demokrati sedan 1980-talet – Attityder, stigberoenden och teknisk-politisk kulturrevolution. SKB R-08-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 31-3 **Frostenson M, 2008.** Etisk argumentation i kärnavfallsfrågan – Etiska värderingskonflikter i diskussionen om det svenska kärnavfallet. SKB R-08-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 31-4 **Sjöberg L, 2008.** Attityd till slutförvar av använt kärnbränsle – struktur och orsaker. SKB R-08-119, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 32

- 32-1 **Hansson S O, 2010.** Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan, Svensk Kärnbränslehantering AB. ISBN 978-91-977862-9-4.
- 32-2 **Cramér P, Stendahl S, Erhag T, 2010.** Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg – ett rättsligt perspektiv. SKB-R-10-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Opublicerade dokument

SKBdoc id	Version	Titel	Utfärdare, år
1049861	1.0	Preliminär avvecklingsplan för SFR.	SKB, 2007
1056406	5.0	Organisation, ledning och styrning – Uppförande och driftsättning.	SKB, 2009
1175162	3.0	Svetsning vid tillverkning och förslutning.	SKB, 2010
1175208	4.0	Tillverkning av kapselkomponenter.	SKB, 2010
1175236	2.0	Reliability in friction stir welding of canister.	SKB, 2010
1179633	3.0	Öförstörande provning av kapselkomponenter och svetsar.	SKB, 2010
1193244	3.0	Criticality safety calculations of disposal canisters.	SKB, 2010

Förkortningar

Ab initio	Latin för ”från början”. Ab initio-beräkningar är kvantkemiska beräkningar av elektronstrukturer.
Abaqus	Finita-element-datorkod som används för THM-modellberäkningar.
ABM	Alternativa BuffertMaterial. Experiment i Äspölaboratoriet.
AD	Anno Domini, Herrens år. Efter år noll i vår tidräkning.
ADE-modellering	Modellering av advektiv (vattenburen) transport i form av partikelspårning i så kallad advektiv-dispersiv transportmodellering.
ADS	Accelerator drivet system för separation och transmutation av transuraner.
AECL	Atomic Energy of Canada Ltd, Kanada.
ALARA	As Low As Reasonably Achievable. Alla stråldoser ska hållas så låga som det är rimligt möjligt, en av ICRP:s och SSM:s tre huvudprinciper vid verksamhet med joniserande strålning.
Andra	Agence National Pour la Gestion des Dechets Radioactifs, Frankrike.
Apse	Äspö pillar stability experiment. Experiment i Äspölaboratoriet.
Asha 230	Möjligt material för återfyllning av slutförvaret för använt kärnbränsle.
ATB	Strålskärmda transportbehållare för medelaktivt avfall.
ATB 1T	En ny behållare för transport av långlivat låg- och medelaktivt avfall i BFA-tankar.
Baclo	Utveckling, test och demonstration av återfyllning och förslutning i ett slutförvar. Samarbetsprojekt mellan SKB och Posiva.
BB	Big Bertha. Fullskaleförsök för KBS-3H, utsvällning av bentonit ur supercontainer.
BC	Before Christ. Före år noll i vår tidräkning.
BeFo	Stiftelsen bergteknisk forskning.
BET	Specifik yta.
BFA	Bergrum på Simpevarpshalvön för torr mellanlagring av driftavfall.
BFA-tank	Behållare för lagring av långlivat låg- och medelaktivt avfall.
Bioprotä	Internationellt projekt om biosfäraspekter på bedömningen av slutförvarets långsiktiga säkerhet.
BKAB	Barsebäck Kraft AB.
BLA	Bergrum för lågaktivt avfall i SFR 1.
BMA	Bergrum för medelaktivt avfall i SFR 1.
BP	Before Present. Före nutid.
BTF	Betongtankförvar i SFR 1, främst avsett för avvattnad jonbytarmassa.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor.
CAD	Computer Aided Design. Datorstödd design.
CBI	Cement och BetongInstitutet. Industriforskningsinstitut.
CEA	Commissariat à l’Energie Atomique, Frankrike.
CEC	Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Clab och inkapslingsanläggningen som en integrerad enhet.
Code Bright	Datorkod för termisk-hydraulisk-mekaniska beräkningar.
ConnectFlow	Datorkod för grundvattenflödesberäkningar.
CRT	Canister Retrieval Test. Experiment i Äspölaboratoriet.
Dawe	Drainage, artificial watering and air evacuation. Teknik för dränering, artificiell bevätning och avluftning av ett KBS-3H-förvar.
DarcyTools	Datorkod för grundvattenflödesberäkningar.
Decovalex	Development of coupled models and their validation against experiments in nuclear waste isolation. Internationellt projekt.
DFN	Discrete Fracture Network. Diskret spricknätverksmodell.
Ecolego	Beräkningskod som avses användas för probabilistiska radionuklidtransportberäkningar inom projekt SFR utbyggnad.

EDZ	Excavation damaged zone. Skadad zon, det berg runt ett berguttag där irreversibla förändringar ägt rum.
EdZ	Engineering disturbed zone. Störd zon, det berg bortom den skadade zonen (EDZ), där förändringarna på grund av berguttaget är reversibla.
Emras	Environmental modelling for radiation safety. Miljömodellering för strålsäkerhet. IAEA-projekt.
Enresa	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Spanien.
EPRI	Electric Power Research Institute, USA.
Equip	Evidences from quarternary infillings for palaeohydrology. EU-projekt.
Erica	Environmental risk from ionising contaminants. EU-projekt.
ESDRED	Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs. Euratoms sjätte ramprogram för kärnforskning och utbildningsverksamhet (2002–2006).
FEM	Finite Element Method.
FEP	Feature, Events and Processes. Egenskaper, händelser och processer.
FHA	Future Human Activities. Framtida mänskliga handlingar.
FKA	Forsmarks Kraftgrupp AB.
Forge	EU-projektet som löper under perioden 2009–2012, där Lasgit ingår som en del.
FoU	Forskning och Utveckling.
FSW	Friction Stir Welding. En typ av friktionssvetsning.
Fud	Forskning, utveckling och demonstration.
Futurae	Assessment and management of the impact of radionuclides on man and the environment. Bedömning och hantering av påverkan av radionuklider på människor och miljö. EU-projekt.
GAP	Greenland Analogue Project. Ett forskningsprojekt på västra Grönland för att studera bland annat hydrologiska processer vid en befintlig inlandsis.
GEUS	De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.
GIA	Global Isostatic Adjustment.
GPS	Global Positioning System. System för satellitnavigering.
Holocen	Innevarande mellanistid som började för omkring 11 500 år sedan.
IAEA	International Atomic Energy Agency. FN-organ.
IBECO RWC-BF	Möjligt material för återfyllning och pelletsfyllning.
ICRP	International Commission on Radiological Protection. Oberoende ideell organisation som fungerar som rådgivande internationellt organ för strålskydd.
INE-FZK	Institut für Nukleare Entsorgungstechnik im Forschungszentrum, Karlsruhe, Tyskland.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) som kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
ITT	Isothermal test. Fältförsök utfört av URL, Kanada.
ITU	Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe.
IUR	International Union of Radioecology.
JAEA	Japan Atomic Energy Center.
Kasam	Statens råd för kärnavfallsfrågor. Kallas numera Kärnavfallsrådet.
K_d	Grundämnesspecifik fördelningskoefficient, som beskriver fördelningen av element mellan fast fas och vattenfas.
k_{eff}	Effektiv neutronmultiplikationsfaktor. Det konstruktionsstyrande kravet ur kriticitetssynpunkt är att k_{eff} , inklusive osäkerheter, ska understiga 0,95 under hantering och förvaring av kapslar.
KTB	Ny typ av behållare för transport av inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret.
Lasgit	Large scale gas injection test. Experiment i Äspölaboratoriet.
Loma	Låg- och medelaktivt avfall.
Lot	Long term test of buffer material. Experiment i Äspölaboratoriet.
LTDE-SD	Long Term Diffusion Experiment – Sorption-Diffusion. Experiment i Äspölaboratoriet.

Marfa	Migration analysis for radionuclides in the far field. Datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet.
Matlab	Kommersiell datorkod för matematiska beräkningar.
Micado	Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in a nuclear waste repository. EU-projekt.
Mox	Mixed oxide fuel.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming. Möjligt material för återfyllning.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz.
NDA	Nuclear Decommission Authority, Storbritannien.
NEA	Nuclear Energy Agency. En samarbetsorganisation för atomenergifrågor inom OECD.
NWMO	Nuclear Waste Management Organisation, Kanada.
Numo	Waste management organisation of Japan.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OFP	Oförstörande provning.
OKG	OKG AB (Oskarshamns kraftgrupp).
Padamot	Palaeohydrogeological data analysis and model testing. EU-projekt.
Pandora	SKB:s och Posiva:s modellverktyg för dosberäkningar i biosfären.
Posiva	Posiva Oy, Finland.
Protect	An evaluation of the practicability and relative merits of different approaches to protection of the environment from radiation. EU-projekt.
PSAR	Preliminary Safety Assessment Report. Preliminär säkerhetsredovisning.
PSI	Paul Scherrer Institute, Schweiz.
PSU	Projekt SFR-Utbyggnad.
PWR	Pressurized Water Reactor. Tryckvattenreaktor.
RAWRA	Radioactive Waste Repository Authority, Tjeckien.
RH	Relative Humidity. Relativ fuktighet.
RNR	Radionuclide Retention Experiment. Experiment i Äspölaboratoriet.
S&T	Separation och transmutation.
SAR	Säkerhetsredovisning.
SAR-08	Säkerhetsredovisning för SFR, levererad av SKB i april 2008.
SEM	Scanning Electron Microscope. Svepelektronmikroskop.
SFL	Slutförvar för långlivat avfall.
SFR	Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall.
SFR 1	Slutförvar för radioaktivt driftavfall.
Simfuel	Urandioxid som innehåller icke-radioaktiva fissionsproduktelemt och metallpartiklar liknande de i använt bränsle.
Silon	Förvarsdel i för medelaktivt ingjutet avfall i SFR 1.
SR-Can	Redovisning av slutförvarets säkerhet på lång sikt, publicerad av SKB i november 2006. Can efter engelskans "canister", det vill säga kapsel.
SR-Site	Analys av slutförvarets säkerhet på lång sikt. Site efter engelskans "site", det vill säga plats.
STF	Säkerhetstekniska driftförsättningar.
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
SVAFO	AB SVAFO som ägs av Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG AB samt Barsebäck Kraft AB ingår i Vattenfallkoncernen. Verksamheten omfattar hantering och behandling av avfall från tidigare forsknings- och utvecklingsverksamhet i bland annat Studsvik för att möjliggöra slutförvaring.
Swiw	Single well injection withdrawal tracer test. Experiment i Äspölaboratoriet.
TBM	Tunnel Boring Machine. Tunnelborrmaskin.
TBT	Temperature Buffer Test. Experiment i Äspölaboratoriet.
TF EBS	Task Force on Engineered Barrier Systems. Experiment i Äspölaboratoriet.
TF GWFTS	Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Experiment i Äspölaboratoriet.

THM	Termisk-Hydraulisk-Mekanisk.
True	Tracer retention understanding experiments. Experiment i Äspölaboratoriet.
URL	Underground Rock Laboratory, Kanada.
XANES	X-ray Absorption Near Edge Structures.
XRD	X-ray diffraction. Röntgendiffraktion.
3DEC	Datorkod för bergmekaniska analyser.