

Fud-program 2004

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

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

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

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



Fud-program 2004

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

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 utveckling och övriga åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara kärnavfall på ett säkert sätt samt för att avveckla och riva kärnkraftverken. För att uppfylla det kravet presenterar SKB nu Fud-program 2004. Programmet redovisar SKB:s planer för perioden 2005–2010. Det vi närmast överblickar är perioden 2005–2007. Detaljeringsgraden för de tre därpå följande åren är av naturliga skäl lägre.

Programmet ger underlag för att utforma system för säker hantering och slutförvaring av det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken. SKB:s plan är att genomföra djupförvaring av det använda bränslet enligt KBS-3-metoden. I Fud-programmet redovisar vi vår verksamhet och planering för detta samt det arbete som bedrivs om alternativa metoder. Granskningen av programmet kan tillföra värdefulla synpunkter utifrån. Myndigheter och regeringen kan tydliggöra hur de ser på olika delar av verksamheten och ange riktlinjer för framtiden. Kommuner och andra intressenter får ett underlag för att framföra sina synpunkter till SKB, myndigheter eller regeringen.

För perioden fram till slutet av 2008 är målet att kunna lämna in tillståndsansökningar för inkapslingsanläggningen och djupförvaret. Detta Fud-program skiljer sig därför från de närmast föregående genom att det koncentrerar sig på frågor som rör teknikutveckling för dessa anläggningar. Programmen för säkerhetsanalys och forskning om de långsiktiga processer som äger rum i djupförvaret länkas sedan ihop med programmen för teknikutveckling. En nyhet i detta Fud-program är att vi också redovisar vårt program för samhällsvetenskaplig forskning vilket flera remissinstanser efterfrågade vid granskningen av Fud-program 2001. Avslutningsvis behandlas i detta Fud-program också programmen för alternativa metoder, rivning och annat långlivat avfall.

I det yttrande över Fud-program 2001, som SKI lämnade till regeringen i mars 2002, begärde myndigheten en redogörelse som tydligt klargjorde planeringen för återstoden av kärnavfallsprogrammet. Som huvudmotiv för denna begäran angav SKI att berörda myndigheter måste få klarlagt vilka granskningar som förväntas komma under de närmaste tio åren samt hur dessa beror av varandra. En sådan redogörelse finns bifogad detta Fud-program.

Det är vår förhoppning att ovanstående struktur och betraktelsesätt ger en tydlig bild hur långt teknikutvecklingen har kommit och av vilka faktorer som är viktigast för säkerheten i djupförvaret.

Stockholm i september 2004

Svensk Kärnbränslehantering AB



Claes Thegerström
VD



Tommy Hedman
Chef Teknik

Sammanfattning

Föregående Fud-program 2001 var koncentrerat på forskning och teknikutveckling. Forskningen med inriktning på analysen av den långsiktiga säkerheten betonades och synpunkter från tidigare granskningar av SR 97 och Fud-program 98 behandlades ingående. SR 97 var en analys av den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar för använt kärnbränsle. Detta Fud-program 2004 är främst inriktat på att belysa utvecklingen av tillverkning och förslutning av kapslar för slutförvaring av använt bränsle. Anledningen är den ansökan om tillstånd för en inkapslingsanläggning, som SKB avser att lämna in under den kommande programperioden.

Ett övergripande mål för SKB är att den första etappen av djupförvaret för använt kärnbränsle ska stå klart 2017 för inledande drift. Reguljär drift bör då kunna inledas omkring 2023, innan förvaringsutrymmena i Clab blivit fyllda. Tidsplaner över så långa tidsperspektiv rymmer naturligtvis osäkerheter och måste uppdateras efterhand, men samtidigt utgör de en viktig grund för beslut om inriktning och prioritering för de närmaste åren. Under 2002 inledde SKB ett skede med platsundersökningar i Östhammar och Oskarshamn. Undersökningar av berggrunden genomförs på platser i anslutning till Forsmarksverket och Oskarshamnsverket. Målet för platsundersökningsskedet är att få de tillstånd som behövs för att lokalisera och bygga djupförvaret och inkapslingsanläggningen.

Nästa Fud-program, som lämnas in 2007, förutses ge en central plats åt djupförvarstekniken och det fortsatta arbetet med alternativa deponeringsmetoder. Det därpå följande Fud-program 2010 ska framför allt redogöra för SKB:s system för att ta hand om låg- och medelaktivt avfall.

I det här Fud-programmet presenteras den handlingsplan som efterlystes i granskningen av Fud 2001 och senare även begärdes av regeringen i samband med godkännandet. Handlingsplanen sammanfattas i kapitel 2 och redovisas i sin helhet i bilaga A. Den innebär bland annat att SKB nu tar fram det underlag som behövs för att 2006 kunna ansöka om inkapslingsanläggningen och 2008 om djupförvaret. Tillståndsprövning och erforderliga beslut om uppförande av det planerade djupförvarssystemet borde då kunna genomföras så att uppförandet inleds cirka 2010 och driften startar 2017.

Tekniken för deponering av använt bränsle enligt KBS-3-konceptet utvecklas inför ansökningarna om tillstånd för inkapslingsanläggningen och djupförvaret. Arbetet är inriktat på en referensutformning för var och en av de olika delarna av systemet och utformningen i detalj sker stegvis. De slutliga valen görs först efter att grundligt ha värderat säkerhet, teknik, kostnader och miljöaspekter.

Kapseln, i vilken det använda bränslet ska deponeras, står i centrum för redovisningen av teknikutvecklingen. I referensutformningen är kapseln utförd med en gjuten insats av segjärn och ett fem centimeter tjockt kopparhölje. Kopparhöljet skyddar mot korrosion och insatsen mot deformation. Arbetet med att i detalj konstruera kapseln och att utvärdera tillverknings-, förslutnings- och provningsmetoder fortsätter, se kapitel 5. Kapselns delar kommer att tillverkas hos olika leverantörer, sammansättning och slutkontroll före leverans till inkapslingsanläggningen kommer att ske i kapselfabriken.

I inkapslingsanläggningen kommer kapslarna att fyllas med det använda bränslet och därefter förslutas. Två svetsmetoder utvecklas parallellt på Kapsellaboratoriet: elektronstrålesvetsning och friction stir welding, se kapitel 6. Där utvecklas även metoder för oförstörande provning. Kvalificeringen av metoderna för tillverkning, svetsning och oförstörande provning är ett viktigt steg som måste tas innan verksamheten i inkapslingsanläggningen kan inledas, se kapitel 7.

SKB har startat ett projekt för att utforma och planera för byggandet av inkapslingsanläggningen. Den kan antingen lokaliseras i anslutning till Clab eller i anslutning till djupförvaret. Det är en fördel om anläggningen kan samordnas med befintlig verksamhet, och SKB:s huvudalternativ är därför att bygga anläggningen vid Clab. Projekteringen av anläggningen utgår från resultaten av teknikutvecklingen och samordnas med arbetet med miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) samt säkerhets- och systemanalyser, se kapitel 8. Transporterna av de färdiga kapslarna från inkapslingsanläggningen till djupförvaret behandlas i kapitel 9.

Djupförvaret utformas och detaljeras inför tillståndsansökan. Teknik utvecklas för att bryta och täta berget i anslutning till tunnlarna, tillverka och placera in bufferten, hantera kapslarna och slutligen återfylla och plugga igen deponeringstunnlarna. Ytterligare områden som studeras är tätning av borrhål och teknik för att återta kapslar efter den inledande driften, om så skulle erfordras. Programmet beskrivs i kapitel 10. Projekteringen av djupförvaret bygger på resultaten från teknikutvecklingen och platsundersökningarna, och samordnas med MKB-arbetet, samt säkerhets- och systemanalyserna, se kapitel 11. Referensutformningen består av vertikala deponeringshåll i horisontella tunnlarna, benämnt KBS-3V. Under de kommande åren utreds även en alternativ utformning nämligen horisontell deponering av kopparkapslar, KBS-3H. Detta görs i nära samarbete med den finska organisationen Posiva.

Djupförvaret ska vara säkert även utan övervakning och underhåll, men någon typ av långtidsobservationer eller mätningar kan ändå vara motiverade, till exempel för att öka den vetenskapliga förståelsen av platsen och förvaret. En viktig uppgift är också att säkerställa att inget klyvbart material kan lämna anläggningen under tiden den är i drift. Vilka krav som kan komma att ställas och hur detta kan hanteras diskuteras i kapitel 12.

Säkerhetsanalys och forskning. Förvarets långsiktiga säkerhet prövas och utvärderas med hjälp av säkerhetsanalysen. Det första steget är att beskriva förvarets initialtillstånd för att sedan kartlägga tänkbara förändringar på lång sikt och till sist beskriva konsekvenserna för människa och miljö. Kunskap om långsiktiga förändringar hämtas från forskningen vars uppgift det är att bygga under säkerhetsanalysen och förse den med nödvändiga modeller och indata. Underlag till säkerhetsanalysen hämtas även från undersökningarna av tänkbara förvarsplatser och detaljerna i det tekniska utförandet. Omvänt styr säkerhetsanalysens behov forskningen på området och är väsentlig för både designstudier och platsundersökningar.

Säkerhetsanalysen utnyttjar modeller som utvecklas inom forskningen och tar även fram särskilda modellverktyg för integrerad modellering, se kapitel 14. Förvarets utveckling efterliknas med systemmodeller. Transport av friggjorda radionuklider beräknas med såväl numeriska som analytiska metoder.

Säkerhetsanalysens närmaste mål är en säkerhetsrapport som behandlar djupförvaring av använt bränsle och som ska ingå i ansökan om att få uppföra en inkapslingsanläggning. Projektet benämns SR-Can, och kommer senare att avlösas av SR-Site som blir inriktat på ansökan om ett djupförvar.

SKB:s forskning är till stor del inriktad på att utreda den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar med använt bränsle. I kapitlen 15 till 19 redovisas forskningsprogrammen för bränslet, kapseln som barriär, bufferten, återfyllningen och geosfären. För varje del behandlas först forskningen om initialtillståndet och därefter samtliga processer indelade i strålningsrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska (inklusive mikrobiella) samt processer relaterade till radionuklidtransport. Kapitel 20 och 21 behandlar forskning för att kartlägga de förändringar som biosfärens och klimatets utveckling ger upphov till.

Det använda bränslet utgör avfallet som förvaret ska innesluta. Flera processer berör avfallet och en viktig sådan är upplösning om grundvatten skulle tränga in via en skada i kapseln. Det är väsentligt att behandla detta i säkerhetsanalysen och forskning om bränsleupplösning är ett prioriterat forskningsområde, se kapitel 15. Modeller för bränsleupplösning kommer att prövas i SR-Can.

Kapselbarriären är den viktigaste när det gäller att isolera det använda bränslet. Kapseln ska motstå mekaniska belastningar och korrosion. Hållfastheten för kapseln provas och beräknas, och korrosion av koppar och järn fortsätter att vara ett aktivt forskningsområde där olika typer av experiment genomförs, se kapitel 16.

Bufferten ska skydda kapslarna och även fördröja spridning av radionuklider. För en utvärdering av den långsiktiga säkerheten är det väsentligt att kunna förutsäga vilket tillstånd bufferten når efter deponeringen. Flera processer, hydrauliska, mekaniska och termiska är involverade, och förloppet studeras både i fält och med modeller. Efter vattenmättnad är bufferten enklare att beskriva men det är långa tider som ska överblickas, och viktiga processer som behöver studeras är gastransport, kolloidfrigörelse och erosion, samt växelverkan mellan buffert och kapsel, se kapitel 17.

Återfyllningen ska stabilisera tunnarna, hålla bufferten på plats och hindra vattenflödet genom tunnarna. Olika koncept för tunnelåterfyllning och olika lerbaserade material testas. Processer som alltså studeras är svällningen och sådant som kan påverka detta, till exempel kemisk påverkan, kolloidbildning och erosion, se kapitel 18.

Geosfären skyddar kapslarna och är dessutom en barriär mot spridning av radionuklider. Modeller utvecklas som beskriver hur berget runt förvaret rör sig om det inträffar en jordbävning i framtiden, till exempel efter en inlandsis. Andra modeller som utvecklas är sådana som beskriver grundvattnets rörelser i berget och grundvattnets kemi. De behövs för att vi ska förstå platserna som undersöks för djupförvaret, pröva hur stabila förhållandena är som ska skydda kapseln och göra de beräkningar av radionuklidspridning som är väsentliga för att kunna analysera säkerheten, se kapitel 19. Experiment och mätningar som behöver göras utförs i laboratorier eller direkt i berget, till exempel i Äspölaboratoriet.

Biosfären är där vi människor befinner oss och där eventuella utsläpp från djupförvaret skulle få konsekvenser. Det har skett en betydande utveckling av biosfärsmodellen, men för att kunna beräkna spridning av radionuklider behövs det en sammanhängande beskrivning från geosfären till biosfären. SKB har tagit fasta på det i forskningsprogrammet. Fortsatt arbete ägnas även åt att ytterligare definiera och beskriva de viktigaste processerna i olika typer av ekosystem, se kapitel 20. För att analysera säkerheten är det viktigt att undersöka platsen men också nödvändigt att bedöma vilka förändringar som kan ske där i framtiden. Det finns därför en stark koppling till programmet som behandlar klimatets utveckling.

Klimatet förändras kontinuerligt och påverkar strandlinjeförskjutning, utveckling av permafrost och inlandsisar i Sverige. Detta påverkar i sin tur både biosfär och geosfär. En viktig fråga för säkerhetsanalysen, och målet för den forskning som redovisas i kapitel 21, är att kartlägga vilka klimatförhållanden som är möjliga och beskriva hur de kan påverka djupförvarets säkerhet på lång sikt.

Samhällsvetenskap. SKB har beslutat att driva och finansiera samhällsvetenskaplig forskning för att kunna ta fram ett brett och fullständigt underlag om samhällsaspekter till den miljökonsekvensbeskrivning (MKB), som ska åtfölja ansökningarna om att få bygga inkapslingsanläggningen respektive djupförvaret. Fyra samhällsvetenskapliga forskningsområden har valts ut: socioekonomiska effekter, beslutsprocesser, psykosociala effekter och omvärldsförändringar. En beredningsgrupp, bestående av forskare inom samhälls- och beteendevetenskap har utsetts för att hjälpa till att definiera forskningsprojekten, se kapitel 22.

Alternativa metoder. SKB följer utvecklingen av två alternativ till KBS-3-konceptet: separation och transmutation samt deponering i flera kilometer djupa borrhål, se kapitel 23. Det är långtifrån säkert att någon av de här två metoderna någonsin blir användbar, men det kan ändå vara berättigat att följa vad som görs internationellt. I Sverige bedrivs grundläggande forskning om separation och transmutation med stöd av SKB. Forskarna deltar i de internationella projekten och hjälper därigenom SKB att följa kunskapsutvecklingen på området.

Rivning. Dekontaminering och rivning av uttjänta anläggningar är ytterst innehavarens ansvar. När det gäller kärnkraftverken har SKB fått uppgiften att göra generella studier av rivning och därigenom säkerställa att kompetens finns och att kostnader bedöms på ett korrekt sätt. Sedan är det kraftverken själva som planerar, ansöker om tillstånd och till slut ser till att anläggningen rengörs och rivs. SKB är med och tar hand om avfallet, se kapitel 24. En metod för torr mellanlagring av hårdkomponenter har utvecklats liksom ett system för registrering av avfall avsett för slutförvaring i framtida förvar. Ett mer omfattande rivningsprogram beräknas inte starta förrän tidigast 2020.

Låg- och medelaktivt avfall. Räknat i volym är större delen av avfallet från kärnkraftverken kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Det uppkommer både vid driften och när anläggningen till slut rivs. För detta avfall finns SFR i Forsmark som varit i drift sedan 1988. Där deponeras driftavfall från kärnkraftverken och en mindre andel radioaktivt avfall från forskning, medicin och industri, som levereras via ett mellanlager i Studsvik. Det kortlivade avfallet från rivning ska enligt planerna deponeras i en framtida utbyggnad av SFR.

Vid rivning av kärnkraftverken tillkommer även större mängder långlivat skrot från interna delar och hårdkomponenter. Detta tillsammans med långlivat avfall från forskning och industri måste också slutförvaras. Förvaret behöver inte lokaliseras och byggas förrän om drygt 30 år så för närvarande är verksamheten begränsad till forskning som en förberedelse till kommande analyser av den långsiktiga säkerheten, se kapitel 25.

Innehåll

Del I SKB:s program och handlingsplan

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Kärnavfallssystemet | 19 |
| 1.1 | Anläggningar för kärnavfall | 19 |
| 1.1.1 | SFR | 20 |
| 1.1.2 | Clab | 20 |
| 1.1.3 | Transportsystemet | 20 |
| 1.2 | Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration | 21 |
| 1.2.1 | Äspölaboratoriet | 21 |
| 1.2.2 | Kapsellaboratoriet | 23 |
| 1.3 | Planerade anläggningar | 24 |
| 1.3.1 | Inkapslingsanläggningen | 24 |
| 1.3.2 | Djupförvaret | 26 |
| 1.4 | Slutförvar för låg- och medelaktivt avfall | 28 |
| 2 | Handlingsplan | 29 |
| 2.1 | Kärnbränsleprogrammet | 30 |
| 2.1.1 | Nuläge | 30 |
| 2.1.2 | Planering | 31 |
| 2.2 | Loma-programmet | 34 |
| 2.2.1 | Nuläge | 34 |
| 2.2.2 | Planering | 34 |
| 3 | Fud-program | 35 |
| 3.1 | Fud-program 2004 – kärnbränsle | 35 |
| 3.1.1 | Teknikutveckling | 35 |
| 3.1.2 | Säkerhetsanalys och forskning | 36 |
| 3.2 | Fud-program 2004 – Loma | 36 |
| 3.2.1 | Rivning | 36 |
| 3.2.2 | Loma | 37 |
| 3.3 | Fud-program 2004 – internationellt samarbete | 37 |
| 3.4 | Kommande Fud-program | 38 |

Del II Teknikutveckling

| | | |
|----------|--|----|
| 4 | Översikt – teknikutveckling | 41 |
| 4.1 | Kapseltillverkning | 41 |
| 4.2 | Förslutningsteknik | 41 |
| 4.3 | Kvalificering | 42 |
| 4.4 | Inkapsling | 42 |
| 4.5 | Transporter av inkapslat bränsle till djupförvaret | 42 |
| 4.6 | Djupförvarsteknik | 42 |
| 4.7 | Projektering av djupförvaret | 43 |
| 4.8 | Långtidsobservationer | 43 |
| 5 | Kapsel – tillverkning | 45 |
| 5.1 | Konstruktionsförutsättningar | 46 |
| 5.2 | Acceptanskriterier | 47 |
| 5.3 | Materialteknik | 49 |
| 5.3.1 | Kapselinsatser | 49 |
| 5.3.2 | Kapselrör, lock och bottenar | 54 |
| 5.4 | Provtillverkning | 56 |
| 5.4.1 | Kapselinsatser | 56 |
| 5.4.2 | Kapselrör, lock och bottenar | 58 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.5 | Oförstörande provning av kapselkomponenter | 60 |
| 5.6 | Kapselabrik | 63 |
| 6 | Kapsel – förslutning | 65 |
| 6.1 | Planering | 65 |
| 6.2 | Elektronstrålesvetsning | 66 |
| 6.2.1 | Svetsutrustning | 66 |
| 6.2.2 | Svetsprocessen | 70 |
| 6.3 | Friction stir welding | 75 |
| 6.3.1 | Verktyg | 75 |
| 6.3.2 | Svetsutrustning | 76 |
| 6.3.3 | Svetsprocessen | 78 |
| 6.4 | Oförstörande provning av förslutningssvetsen | 82 |
| 7 | Kapsel – kvalificering | 87 |
| 7.1 | Kvalificering av metoder för tillverkning och svetsning | 87 |
| 7.2 | Kvalificering av metoder för oförstörande provning | 89 |
| 8 | Kapsel – inkapsling | 93 |
| 8.1 | Inkapslingsanläggning vid Clab | 93 |
| 8.1.1 | Anläggningen | 93 |
| 8.1.2 | Projektering och ansökan | 98 |
| 8.2 | Inkapslingsanläggning vid djupförvaret | 99 |
| 8.3 | Fysiskt skydd | 101 |
| 8.4 | Safeguards | 101 |
| 9 | Transporter av inkapslat bränsle | 103 |
| 9.1 | Inledning | 103 |
| 9.2 | Behovet av transporter | 103 |
| 9.2.1 | Sjötransport | 103 |
| 9.2.2 | Landtransport | 104 |
| 9.2.3 | Alternativ för transporter av kapslar | 104 |
| 9.3 | SKB:s transportsystem – utrustning och funktion | 105 |
| 9.3.1 | Dagens transportsystem för använt kärnbränsle och driftavfall | 105 |
| 9.3.2 | Erfarenheter av driften | 105 |
| 9.3.3 | Transport av inkapslat bränsle | 106 |
| 9.3.4 | Samordning med dagens transportsystem | 108 |
| 9.4 | Krav och förutsättningar för transporter | 108 |
| 9.4.1 | Transportbestämmelser | 108 |
| 9.4.2 | Tillstånd | 109 |
| 9.4.3 | Tillämpning för kommande transporter | 109 |
| 9.4.4 | Safeguards | 110 |
| 9.5 | Program | 110 |
| 9.5.1 | Transportsystem i drift | 110 |
| 9.5.2 | Utrustning för kapseltransport | 110 |
| 9.5.3 | Redovisningar | 111 |
| 10 | Djupförvar – teknik | 113 |
| 10.1 | Bergbyggnadsteknik | 113 |
| 10.1.1 | Krav och förutsättningar | 113 |
| 10.1.2 | Teknik för berguttag | 113 |
| 10.1.3 | Tätning av berget med injektering | 117 |
| 10.1.4 | Bergförstärkning | 118 |
| 10.2 | Buffert | 119 |
| 10.2.1 | Krav och förutsättningar | 119 |
| 10.2.2 | Tillverkningsteknik | 120 |

| | | |
|--|--|------------|
| 10.3 | Deponeringsteknik | 121 |
| 10.3.1 | Krav och förutsättningar | 121 |
| 10.3.2 | Hantering och deponering | 121 |
| 10.4 | Återfyllning och förslutning | 122 |
| 10.4.1 | Krav och förutsättningar | 122 |
| 10.4.2 | Material och kompakteringsteknik | 122 |
| 10.4.3 | Förslutning | 123 |
| 10.5 | Förslutning av undersökningshål | 124 |
| 10.5.1 | Krav och förutsättningar | 124 |
| 10.5.2 | Teknik för tätning av borrhål | 124 |
| 10.6 | Återtag | 125 |
| 10.6.1 | Krav och förutsättningar | 125 |
| 10.6.2 | Friläggning av kapsel | 125 |
| 10.7 | KBS-3 med horisontell deponering | 126 |
| 11 | Djupförvar – projektering | 129 |
| 11.1 | Metodik för projektering | 129 |
| 11.2 | Förutsättningar | 130 |
| 11.2.1 | Konstruktionsförutsättningar | 130 |
| 11.2.2 | Styrning och kontroll | 132 |
| 11.2.3 | Dokumentation | 133 |
| 11.3 | Genomförande – stegvis projektering | 134 |
| 12 | Djupförvar – övervakning | 139 |
| 12.1 | Långtidsobservationer | 139 |
| 12.2 | Safeguards och fysiskt skydd | 141 |
| | | |
| Del III Säkerhetsanalys och forskning | | |
| 13 | Översikt – säkerhetsanalys och forskning | 145 |
| 13.1 | Säkerhetsanalys | 145 |
| 13.2 | Forskning om långsiktig säkerhet | 146 |
| 13.2.1 | Bränsle | 149 |
| 13.2.2 | Kapsel | 149 |
| 13.2.3 | Buffert | 149 |
| 13.2.4 | Återfyllning | 149 |
| 13.2.5 | Geosfär | 150 |
| 13.2.6 | Biosfär | 150 |
| 13.2.7 | Klimat | 150 |
| 13.2.8 | Naturliga analogier | 151 |
| 13.2.9 | Forskning i Äspölaboratoriet | 151 |
| 13.3 | Samhällsvetenskaplig forskning | 152 |
| 13.3.1 | Socioekonomiska effekter | 152 |
| 13.3.2 | Beslutsprocesser | 152 |
| 13.3.3 | Psykosociala effekter | 152 |
| 13.3.4 | Omvärldsförändringar | 152 |
| 13.4 | Alternativa metoder | 153 |
| 13.4.1 | Separation och transmutation | 153 |
| 13.4.2 | Djupa borrhål | 153 |
| 14 | Säkerhetsanalys | 155 |
| 14.1 | Metodik för analys av djupförvarets långsiktiga säkerhet | 155 |
| 14.2 | Integrerad modellering | 156 |
| 14.2.1 | Systemutveckling | 156 |
| 14.2.2 | Radionuklidtransport och dos | 158 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 15 | Bränsle | 163 |
| 15.1 | Initialtillstånd i bränsle/hålrum | 163 |
| 15.1.1 | Variabler | 163 |
| 15.1.2 | Geometri | 164 |
| 15.1.3 | Strålintensitet | 164 |
| 15.1.4 | Temperatur | 164 |
| 15.1.5 | Hydrovariabler | 165 |
| 15.1.6 | Mekaniska spänningar | 165 |
| 15.1.7 | Totalt radionuklidinventarium | 165 |
| 15.1.8 | Gapinventarium | 167 |
| 15.1.9 | Materialsammansättning | 167 |
| 15.1.10 | Vattensammansättning | 167 |
| 15.1.11 | Gassammansättning | 168 |
| 15.2 | Processer i bränsle/hålrum | 168 |
| 15.2.1 | Översikt av processer | 168 |
| 15.2.2 | Radioaktivt sönderfall | 169 |
| 15.2.3 | Stråldämpning/värmealstring | 169 |
| 15.2.4 | Inducerad fission (kriticitet) | 169 |
| 15.2.5 | Värmetransport | 170 |
| 15.2.6 | Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation | 170 |
| 15.2.7 | Termisk expansion/kapslingsbrott | 170 |
| 15.2.8 | Advektion och diffusion | 170 |
| 15.2.9 | Restgasradiolys/syrabildning | 170 |
| 15.2.10 | Vattenradiolys | 170 |
| 15.2.11 | Metallkorrosion | 171 |
| 15.2.12 | Bränsleupplösning | 171 |
| 15.2.13 | Lösning av gapinventarium | 180 |
| 15.2.14 | Speciering av radionuklider, kolloidbildning | 180 |
| 15.2.15 | Heliumproduktion | 182 |
| 16 | Kapseln som barriär | 183 |
| 16.1 | Initialtillstånd för kapseln | 183 |
| 16.1.1 | Variabler | 183 |
| 16.1.2 | Geometri | 183 |
| 16.1.3 | Strålintensitet | 184 |
| 16.1.4 | Temperatur | 184 |
| 16.1.5 | Mekaniska spänningar | 184 |
| 16.1.6 | Materialsammansättning | 185 |
| 16.2 | Kapselprocesser | 185 |
| 16.2.1 | Översikt av processer | 185 |
| 16.2.2 | Stråldämpning/värmealstring | 185 |
| 16.2.3 | Värmetransport | 186 |
| 16.2.4 | Deformation gjutjärnsinsats | 186 |
| 16.2.5 | Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck | 186 |
| 16.2.6 | Termisk expansion | 187 |
| 16.2.7 | Deformation från inre korrosionsprodukter | 187 |
| 16.2.8 | Korrosion gjutjärnsinsats | 188 |
| 16.2.9 | Galvanisk korrosion | 188 |
| 16.2.10 | Spänningskorrosion gjutjärnsinsats | 189 |
| 16.2.11 | Strålpåverkan | 189 |
| 16.2.12 | Korrosion kopparkapsel | 189 |
| 16.2.13 | Spänningskorrosion kopparkapsel | 190 |
| 16.2.14 | Korntillväxt koppar | 191 |
| 16.2.15 | Radionuklidtransport | 191 |
| 16.2.16 | Integrerade studier – skadad kapsels utveckling | 191 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 17 | Buffert | 193 |
| 17.1 | Buffertens initialtillstånd | 195 |
| 17.1.1 | Variabler | 195 |
| 17.1.2 | Geometri | 195 |
| 17.1.3 | Porgeometri | 196 |
| 17.1.4 | Strålintensitet | 197 |
| 17.1.5 | Temperatur | 197 |
| 17.1.6 | Montmorillonithalt | 197 |
| 17.1.7 | Vattenhalt | 198 |
| 17.1.8 | Gashalter | 198 |
| 17.1.9 | Hydrovariabler | 198 |
| 17.1.10 | Svälltryck | 198 |
| 17.1.11 | Montmorillonitsammansättning | 199 |
| 17.1.12 | Porvattensammansättning | 199 |
| 17.1.13 | Föroreningshalter | 199 |
| 17.2 | Processer i bufferten | 200 |
| 17.2.1 | Översikt av processer | 200 |
| 17.2.2 | Stråldämpning/värmealstring | 201 |
| 17.2.3 | Värmetransport | 201 |
| 17.2.4 | Vattentransport vid omättade förhållanden | 203 |
| 17.2.5 | Vattentransport vid mättade förhållanden | 204 |
| 17.2.6 | Gastransport/gaslösning | 205 |
| 17.2.7 | Svällning | 207 |
| 17.2.8 | Mekanisk växelverkan buffert/återfyllning | 208 |
| 17.2.9 | Mekanisk växelverkan buffert/kapsel | 209 |
| 17.2.10 | Mekanisk växelverkan buffert/närfältsberg | 210 |
| 17.2.11 | Termisk expansion | 211 |
| 17.2.12 | Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert | 211 |
| 17.2.13 | Advektion | 216 |
| 17.2.14 | Diffusion | 216 |
| 17.2.15 | Osmos | 216 |
| 17.2.16 | Jonbyte/sorption | 217 |
| 17.2.17 | Montmorillonitomvandling | 218 |
| 17.2.18 | Lösning/fällning föroreningar | 220 |
| 17.2.19 | Kolloidfrigörelse/erosion | 220 |
| 17.2.20 | Strålinducerad montmorillonitomvandling | 222 |
| 17.2.21 | Radiolys av porvatten | 222 |
| 17.2.22 | Mikrobiella processer | 222 |
| 17.2.23 | Integrerade processer – utveckling vid mättade förhållanden | 222 |
| 17.2.24 | Radionuklidtransport – advektion | 223 |
| 17.2.25 | Radionuklidtransport – diffusion | 223 |
| 17.2.26 | Radionuklidtransport – sorption | 225 |
| 17.2.27 | Speciering av radionuklider | 225 |
| 17.2.28 | Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit | 225 |
| 18 | Återfyllning | 227 |
| 18.1 | Initialtillstånd för återfyllningen | 227 |
| 18.1.1 | Variabler | 227 |
| 18.1.2 | Geometri | 227 |
| 18.1.3 | Porgeometri | 227 |
| 18.1.4 | Strålintensitet | 227 |
| 18.1.5 | Temperatur | 227 |
| 18.1.6 | Smektithalt | 228 |
| 18.1.7 | Vattenhalt | 229 |
| 18.1.8 | Gashalter | 229 |
| 18.1.9 | Hydrovariabler | 229 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 18.1.10 | Svälltryck | 229 |
| 18.1.11 | Smektitsammansättning | 229 |
| 18.1.12 | Porvattensammansättning | 230 |
| 18.1.13 | Föroreningshalter | 230 |
| 18.2 | Processer i återfyllningen | 230 |
| 18.2.1 | Översikt av processer | 230 |
| 18.2.2 | Integrerade studier – sammansättning och funktion | 230 |
| 18.2.3 | Stråldämpning och värmealstring | 233 |
| 18.2.4 | Värmetransport | 233 |
| 18.2.5 | Vattentransport vid omättade förhållanden | 233 |
| 18.2.6 | Vattentransport vid mättade förhållanden | 234 |
| 18.2.7 | Gastransport/gaslösning | 234 |
| 18.2.8 | Svällning och kompression | 235 |
| 18.2.9 | Mekanisk växelverkan återfyllning/närfältsberg | 235 |
| 18.2.10 | Termisk expansion | 236 |
| 18.2.11 | Advektion | 236 |
| 18.2.12 | Diffusion | 236 |
| 18.2.13 | Osmos | 236 |
| 18.2.14 | Jonbyte/sorption | 237 |
| 18.2.15 | Montmorillonitomvandling | 237 |
| 18.2.16 | Lösning/fällning föroreningar | 237 |
| 18.2.17 | Kolloidfrigörelse/erosion | 238 |
| 18.2.18 | Strålinducerad montmorillonitomvandling | 238 |
| 18.2.19 | Radiolys av porvatten | 238 |
| 18.2.20 | Mikrobiella processer | 239 |
| 18.2.21 | Radionuklidtransport – advektion | 239 |
| 18.2.22 | Radionuklidtransport – diffusion | 239 |
| 18.2.23 | Radionuklidtransport – sorption | 239 |
| 18.2.24 | Radionuklidtransport – speciering av radionuklider | 240 |
| 18.3 | Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet | 240 |
| 19 | Geosfär | 243 |
| 19.1 | Initialtillstånd för geosfären | 243 |
| 19.2 | Processer i geosfären | 243 |
| 19.2.1 | Översikt av processer | 243 |
| 19.2.2 | Värmetransport | 244 |
| 19.2.3 | Grundvattenströmning | 246 |
| 19.2.4 | Gasströmning/gaslösning | 249 |
| 19.2.5 | Rörelser i intakt berg | 249 |
| 19.2.6 | Termisk rörelse | 251 |
| 19.2.7 | Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor | 251 |
| 19.2.8 | Sprickbildning | 253 |
| 19.2.9 | Tidsberoende deformationer | 254 |
| 19.2.10 | Erosion | 255 |
| 19.2.11 | Advektion/blandning – grundvattenkemi | 255 |
| 19.2.12 | Advektion/blandning – radionuklidtransport | 256 |
| 19.2.13 | Diffusion – grundvattenkemi | 257 |
| 19.2.14 | Diffusion – radionuklidtransport | 258 |
| 19.2.15 | Reaktioner med berget – grundvatten/bergmatris | 259 |
| 19.2.16 | Reaktioner med berget – lösning/fällning av sprickmineraler | 260 |
| 19.2.17 | Reaktioner med berget – sorption av radionuklider | 262 |
| 19.2.18 | Mikrobiella processer | 263 |
| 19.2.19 | Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial | 264 |
| 19.2.20 | Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten | 265 |
| 19.2.21 | Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider | 265 |
| 19.2.22 | Gasbildning/gaslösning | 266 |

| | | |
|---|--|-----|
| 19.2.23 | Metanisomsättning | 267 |
| 19.2.24 | Saltutfrysning | 267 |
| 19.2.25 | Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling | 267 |
| 19.2.26 | Integrerad modellering – radionuklidtransport | 269 |
| 20 | Biosfär | 273 |
| 20.1 | Tillståndet i biosfären | 273 |
| 20.2 | Granskningen av Fud 2001 | 274 |
| 20.3 | Förståelse och konceptuella modeller | 275 |
| 20.4 | Modellutveckling | 276 |
| 20.5 | Transportprocesser | 278 |
| 20.6 | Terrestra ekosystem | 280 |
| 20.7 | Akvatiska ekosystem | 283 |
| 20.8 | Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt | 284 |
| 20.9 | Internationellt arbete samt informationsspridning | 285 |
| 20.10 | Säkerhetsanalys | 287 |
| 20.11 | Stödjande forskning för platsundersökningsprogram | 289 |
| 21 | Klimat | 291 |
| 21.1 | Glacialt tillstånd | 294 |
| 21.2 | Permafrost | 298 |
| 21.3 | Tempererat/borealt tillstånd | 299 |
| 22 | Samhällsforskning | 301 |
| 23 | Alternativa metoder | 307 |
| 23.1 | Separation och transmutation | 307 |
| 23.2 | Deponering i djupa borrhål | 319 |
| Del IV Låg- och medelaktivt avfall | | |
| 24 | Rivning | 323 |
| 24.1 | Planering | 323 |
| 24.2 | Teknik för rivning | 324 |
| 24.3 | Avfall från rivning | 325 |
| 24.4 | Program | 326 |
| 25 | Låg- och medelaktivt avfall | 327 |
| 25.1 | Loma-systemets ingående komponenter | 327 |
| 25.2 | Kortlivat låg- och medelaktivt avfall | 328 |
| 25.2.1 | Förvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall | 329 |
| 25.2.2 | Säkerhetsbedömning | 329 |
| 25.3 | Långlivat låg- och medelaktivt avfall | 329 |
| 25.3.1 | Slutförvar för annat långlivat avfall | 330 |
| 25.3.2 | Säkerhetsanalysen | 331 |
| 25.4 | Forskningen | 331 |
| 25.5 | Program för låg- och medelaktivt avfall | 334 |
| Referenser | | 337 |
| Bilaga A | | |
| SKB:s handlingsplan | | 359 |
| Bilaga B | | |
| Förkortningar | | 407 |

Del I

SKB:s program och handlingsplan

- 1 Kärnavfallssystemet
- 2 Handlingsplan
- 3 Fud-program

1 Kärnavfallssystemet

I mer än 30 år har kraftindustrin i Sverige producerat elektricitet med hjälp av kärnkraft. Driften av kärnkraftverken ger upphov till olika typer av radioaktivt avfall, så kallat kärnavfall. De totala mängderna kärnavfall, som till slut ska tas om hand, beror på antalet kärnreaktorer och deras drifttid. Avfallsmängderna påverkar den kapacitet olika avfallsanläggningar behöver ha. Däremot påverkar inte mängderna de grundläggande steg som behövs för att ta hand om avfallet.

Svensk lag reglerar hanteringen av kärnavfallet. Producentansvaret är mycket tydligt i lagstiftningen. Ägarna till kärnkraftverken är ansvariga för att ta hand om kärnavfallet på ett säkert sätt. Här ingår uppgiften att riva anläggningarna när de tjänat ut, bedriva forskning och utveckling kring slutförvaring samt att studera alternativa möjligheter. Ägarna ska stå för samtliga kostnader för detta. Ett program för verksamheten ska redovisas till myndigheterna vart tredje år. Detta program för forskning, utveckling och demonstration, Fud 2004, är en sådan redovisning.

De kraftföretag som har kärnkraftverk är Vattenfall AB (Ringhals), Sydkraft Kärnkraft AB (Barsebäck), OKG Aktiebolag (Oskarshamn) och Forsmarks Kraftgrupp AB. Det gemensamt ägda bolaget Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har kärnkraftsägarnas uppdrag att ta hand om kärnavfallet på ett sådant sätt att människors hälsa och miljön skyddas på kort och lång sikt. Uppdraget är en viktig del av det nationella miljömålet att skapa en säker strålmiljö. SKB:s verksamhet övervakas av Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI).

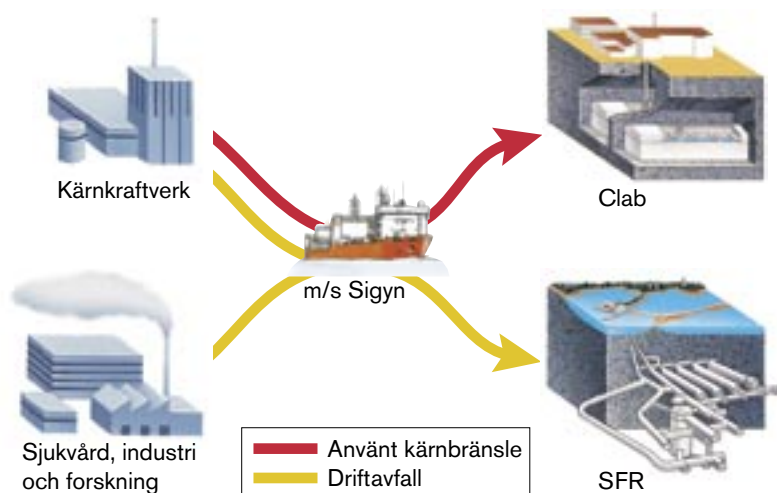
1.1 Anläggningar för kärnavfall

Kärnavfallet delas in i olika kategorier efter graden av radioaktivitet (låg-, medel- eller högaktivt avfall) samt efter aktivitetens varaktighet (kort- eller långlivat avfall). Huvuddelen av avfallet från kärnkraftverken, cirka 85 procent av volymen, är kortlivat och låg- och medelaktivt. Det uppkommer både vid driften av anläggningarna och när dessa rivs. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Rivningsavfallet består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

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

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

Sedan flera år driver SKB ett slutförvar för kortlivat avfall, ett mellanlager för använt kärnbränsle och ett system för att transportera kärnavfallet mellan de olika anläggningarna, se figur 1-1. För att ta hand om och slutförvara allt kärnavfall behövs flera nya anläggningar, bland annat en inkapslingsanläggning för att kapsla in det använda bränslet i kopparkapslar och ett djupförvar för att slutförvara det.



Figur 1-1. Det använda kärnbränslet mellanlagras i Clab. Låg- och medelaktivt driftavfall slutförvaras i SFR.

1.1.1 SFR

För det kortlivade låg- och medelaktiva driftavfallet från kärnkraftverken och behandlingsanläggningarna finns ett slutförvar för radioaktivt driftavfall (SFR). SFR ligger vid kärnkraftverket i Forsmark och har varit i drift sedan 1988. Anläggningen ligger på 50 meters djup under havsbotten.

Förvarsutrymmena utgörs i dag dels av fyra 160 meter långa bergtrum i olika utförande, dels av ett 70 meter högt bergtrum där en betongsilo byggts. I ett av de fyra bergtrummen förvaras lågaktivt avfall inneslutet i vanliga transportcontainrar. Avfallet i denna del av anläggningen kan hanteras utan någon särskild form av strålskärning. Tre av bergtrummen tar emot medelaktivt avfall som kräver strålskärning. Betongsilon är även den avsedd för medelaktivt avfall, främst filter för rening av reaktorvatten. Vid årsskiftet 2003/2004 fanns 30 059 m³ avfall deponerat i SFR. Det totala deponeringsutrymmet är 63 000 m³. En utbyggnad av kapaciteten behövs i framtiden.

1.1.2 Clab

Det använda kärnbränslet mellanlagras i vattenbassänger i ett centralt mellanlager (Clab) vid kärnkraftverket i Oskarshamn. Anläggningen togs i drift 1985. Clab består av en mottagningsdel i marknivå, där transportbehållarna med det använda bränslet tas emot och bränslet lastas ur under vatten.

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

Under de senaste åren har Clab byggts ut. Det andra bergtrummet stod klart vid halvårsskiftet 2004 och kommer enligt planerna att tas i drift i slutet av 2004. Vid årsskiftet 2003/2004 fanns 4 069 ton bränsle (räknat som uran) i anläggningen. Den totala lagringskapaciteten är 8 000 ton bränsle, fördelade på 5 000 ton i de ursprungliga bassängerna och 3 000 ton i de nya.

1.1.3 Transportsystemet

I Sverige sker transporter av kärnavfall till sjöss, eftersom samtliga kärnkraftverk och kärnavfallsanläggningar ligger längs kusten. Transportsystemet består av fartyget m/s Sigyn, ett antal transportbehållare och fordon för lastning och lossning. Systemet har successivt byggts

ut och kompletterats sedan driften startade 1982. Normalt gör Sigyn mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken och Clab respektive SFR. Fartyget hyrs också ut för andra tunga transporter.

Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärmning. Det kan därför transporteras i vanliga containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärmning och gjuts in vid kärnkraftverken. Därefter transporteras avfallet i transportbehållare med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt det är. Det använda bränslet transporteras i behållare med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar. Dessa behållare är också försedda med kylflänsar för att lättare leda bort restvärmen.

1.2 Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

Forskning och utveckling för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle behöver i många delar utföras i full skala och i realistisk miljö. SKB har därför byggt två laboratorier, Äspölaboratoriet och Kapsellaboratoriet, för att genomföra olika forsknings- och utvecklingsprojekt. Resultatet från dessa projekt ger underlag till att utforma djupförvaret och inkapslingsanläggningen samt till de säkerhetsanalyser som ska genomföras.

1.2.1 Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet, som anlades under perioden 1990–1995, är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk. Syftet med anläggningen är att skapa möjlighet till forskning, utveckling och demonstration i en realistisk och ostörd bergmiljö ner till förvarsdjup. Det underjordiska laboratoriet består av en tunnel från Simpevarpshalvön till södra delen av Äspö, där tunneln går i spiral ner till 460 meters djup, se figur 1-2. Dess totala längd är 3 600 meter. I marknivå finns kontorsbyggnader, verkstäder, laboratorier och lokaler för informationsverksamhet som successivt byggts ut. Under sommaren 2003 har ytterligare en förgrening av tunneln sprängts ut för att rymma nya experiment för bland annat bergmekanik och injekteringsteknik.



Figur 1-2. Äspölaboratoriet består av en 3 600 meter lång tunnel som går ner till 460 meters djup.

Verksamheten vid Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriets roll har under senare år förskjutits från att utveckla metoder för att undersöka berget till att utveckla metoder för att bygga och driva djupförvaret. Det första målet för verksamheten vid laboratoriet har därmed uppnåtts. Nästa steg är att genomföra följande uppgifter:

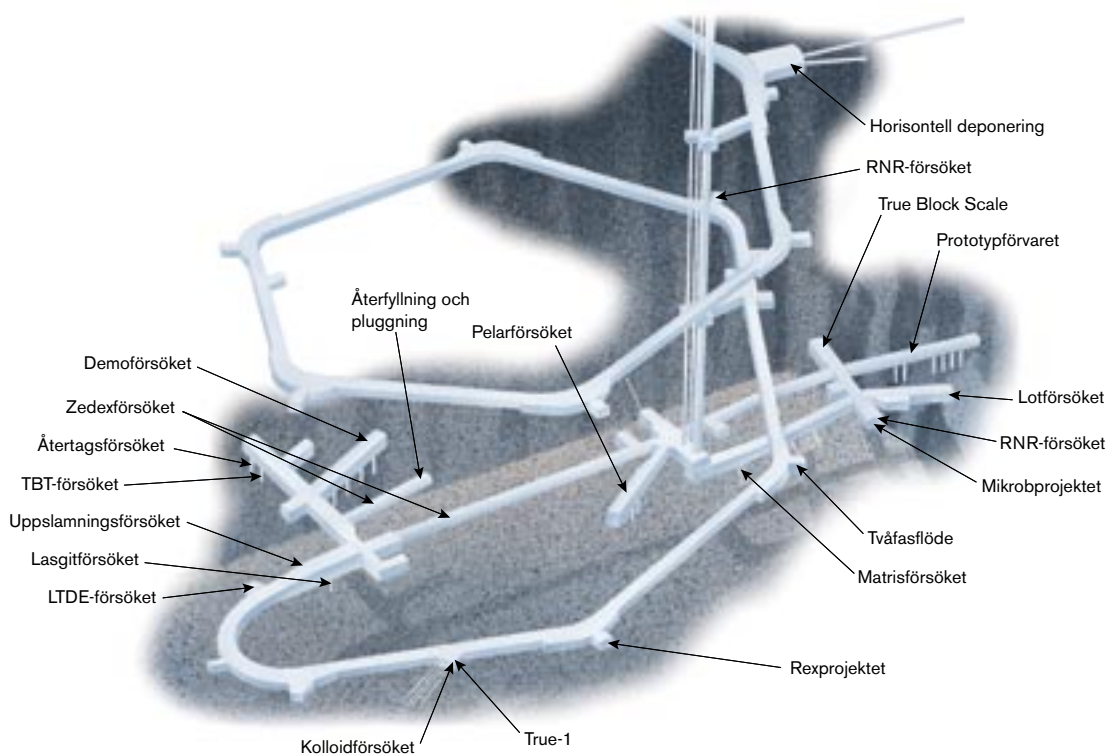
- Utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva djupförvaret.
- Testa alternativ teknik, som kan förbättra och förenkla utformningen av djupförvaret samtidigt som den höga kvaliteten och säkerheten bibehålls.
- Öka den vetenskapliga förståelsen av djupförvarets säkerhetsmarginaler och ge dataunderlag till analyser av den långsiktiga säkerheten.
- Utbilda personal inför genomförandet av olika moment i djupförvarsprojektet.
- Informera om teknik och metoder som utvecklas för djupförvaret.

Verksamheten vid Äspölaboratoriet, som till stor del sker i samverkan med andra länder, kommer enligt planerna att pågå tills den inledande driften av djupförvaret är avslutad. Utvärderingen av erfarenheterna från den inledande driften och från resultaten av pågående försök i Äspölaboratoriet kommer att ligga till grund för ansökan om tillstånd för reguljär drift av djupförvaret. En viktig roll för Äspölaboratoriet i detta perspektiv är därför att genomföra långtidsexperiment där olika aspekter av djupförvarets funktion provas under lång tid, i vissa fall 15–20 år.

Verksamheten bedrivs inom följande områden:

- Naturliga barriärer (bergets mekaniska, hydrologiska och kemiska egenskaper).
- Tillverkade barriärer (buffert och återfyllnad).
- Djupförvarsteknik (berguttag, projektering, hanteringsteknik etc).

De olika experimenten och utvecklingsprojekten, som genomförs i Äspölaboratoriet, presenteras i detta program under respektive forskningsområde. En översikt av experimenten och deras placering ges i figur 1-3.



Figur 1-3. Pågående och tidigare avslutade experiment i Äspötunneln.

Äspö forskarskola

Högskolan i Kalmar inrättade år 2002 en miljövetenskaplig forskarskola med verksamhet vid Äspölaboratoriet. En professor är knuten till utbildningen och där fanns i början av 2004 fyra doktorander. SKB och Oskarshamns kommun stödjer forskarskolan gemensamt med Högskolan i Kalmar. Kalmar Högskola vill bedriva kvalificerad utbildning och forskning inom miljövetenskap, med inriktning mot geovetenskap, och för detta utgör Äspölaboratoriet en unik resurs i regionen för att bedriva forskning om transporter och spridningsmekanismer av miljöstörande ämnen i berg, jordlager och biosfär. SKB är å sin sida intresserat av forskningsresultaten och har ett behov av att säkra kompetensen inom området. Kommunen har ett intresse av att kvalificerad forskning, som är intressant för unga och välutbildade kommuninnevånare, bedrivs.

1.2.2 Kapsellaboratoriet

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

I Kapsellaboratoriet finns stationer för att testa olika svetstekniker och olika metoder för oförstörande provning. Målet är att utveckla metoder som uppfyller ställda kvalitetskrav samt har tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i inkapslingsanläggningen. De viktigaste utrustningarna som finns i laboratoriet är elektronstrålesvets, friktionssvets, röntgen och ultraljud. En interiörbild från Kapsellaboratoriet visas i figur 1-4.



Figur 1-4. Interiör från Kapsellaboratoriet.

1.3 Planerade anläggningar

Med Clab, SFR och transportsystemet kan SKB redan i dag ta hand om det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken. De anläggningar som ytterligare behövs för att ta hand om det använda kärnbränslet, på ett sätt som är säkert även i ett långsiktigt perspektiv, är en inkapslingsanläggning för att kapsla in bränslet i kopparkapslar och ett djupförvar där det inkapslade bränslet kan slutförvaras. Ett transportsystem som är anpassat till dessa anläggningar krävs också. Dessutom behövs förvarsanläggningar för det låg- och medelaktiva avfall som uppstår när de kärntekniska anläggningarna rivs samt för annat långlivat avfall. Figur 1-5 ger en översikt över ett fullt utbyggt system för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall.

1.3.1 Inkapslingsanläggningen

Arbetet med att planera och utforma inkapslingsanläggningen har pågått sedan slutet av 1980-talet. Tillverkningen av kopparkapslarna är fristående från inkapslingsanläggningen. I inkapslingsanläggningen placeras det använda kärnbränslet i kopparkapslar. Anläggningen ska vara dimensionerad för att försluta upp till 200 kapslar per år.

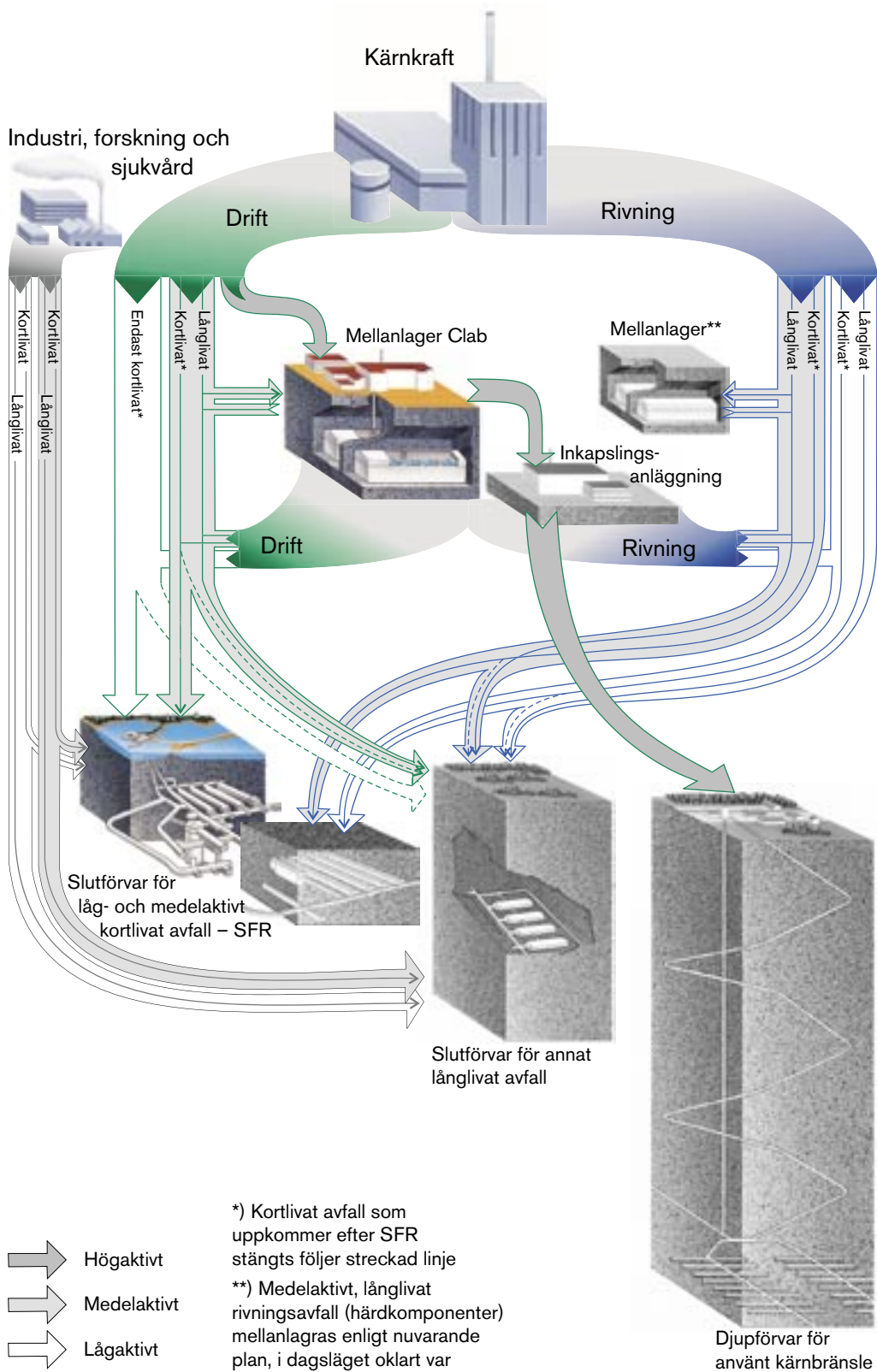
Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet förs upp från inkapslingsanläggningens bassänger till en strålskärmad hanteringscell. Där torkas det och placeras i kapseln. När kapseln är fylld svetsas ett lock av koppar fast på kapseln. Därefter kontrolleras svetsens kvalitet med oförstörande provning. Om svetsen inte godkänns kan den antingen göras om eller också flyttas bränsleelementen över till en ny kapsel.

Efter att den fyllda och förslutna kapseln har godkänts kontrolleras att den är ren utvändigt. Skulle kapseln vara kontaminerad med radioaktiva ämnen tvättas den och kontrolleras igen. När kapseln är godkänd placeras den i en transportbehållare och transporteras till djupförvaret för att deponeras.

Lokalisering

SKB:s huvudalternativ är att inkapslingsanläggningen byggs i anslutning till Clab, så att den kan samordnas med befintlig verksamhet. Det använda bränslet kan då föras över direkt från lagringsbassängerna i Clab till bassängerna i inkapslingsanläggningen. Vid Clab finns det också tillgång till kompetens och erfarenhet av radiologisk verksamhet.

SKB har genomfört en förstudie av en inkapslingsanläggning som är fristående från Clab /1-1/ samt en jämförelse mellan olika alternativa lokaliseringar /1-2/. Den fristående inkapslingsanläggningen antas vara placerad i närheten av djupförvarets ovanjordsdel. Den huvudsakliga tekniska skillnaden mellan den projekterade inkapslingsanläggningen vid Clab och den vid djupförvaret är hur bränslet hanteras och förbereds. I det senare fallet används inga bassänger när det använda bränslet tas emot. Bränslet lagras i stället under torra förhållanden innan det kapslas in.



Figur 1-5. Det fullständiga systemet för att ta hand om kärnavfall.

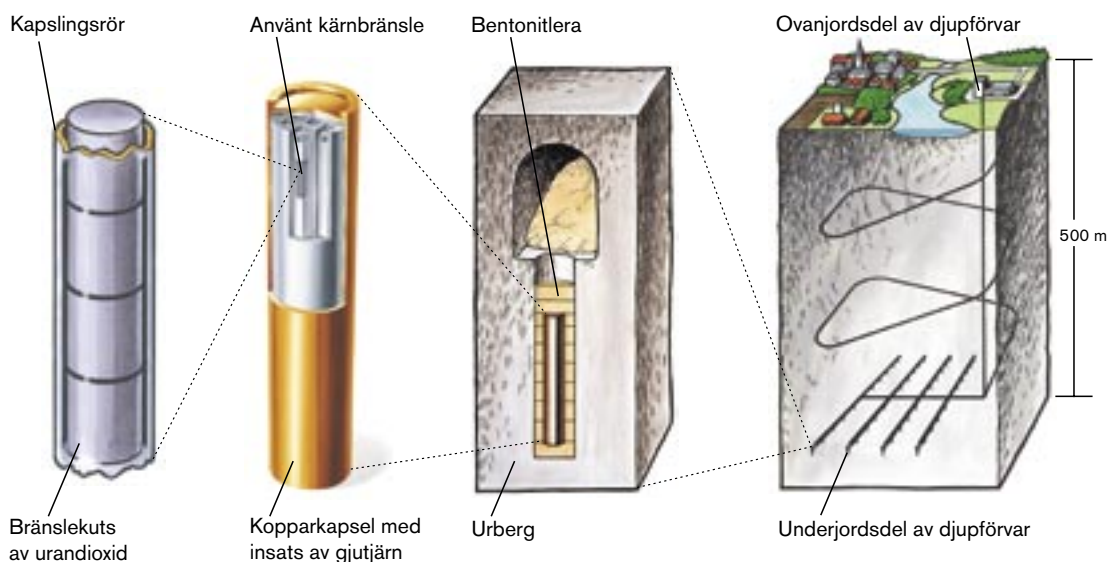
1.3.2 Djupförvaret

SKB:s referensmetod för att ta hand om använt kärnbränsle kallas KBS-3-metoden, där förkortningen KBS står för kärnbränslesäkerhet. Metoden innebär att det använda bränslet kapslas in i kopparkapslar som sedan deponeras, omgivna av en buffert av bentonitlera, i deponeringshål i ett tunnelsystem på ungefär 400–700 meters djup i kristallin berggrund, se figur 1-6.

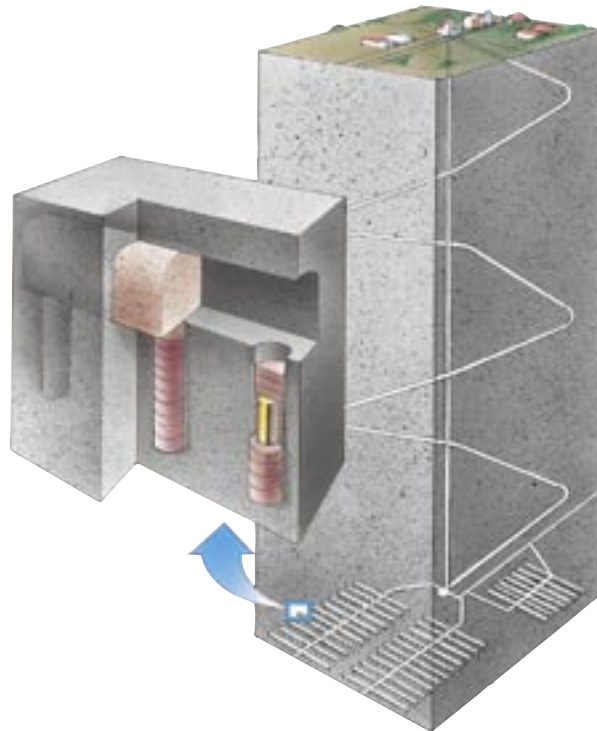
De tre barriärerna (kapseln, bufferten och berget) har till uppgift att isolera de radioaktiva ämnena i bränslet från omgivningen. Det är först om de radioaktiva ämnena förs upp till ytan av grundvattnets rörelser som de blir skadliga för människa och miljö. I djupförvaret är det kapseln som i första hand har den isolerande funktionen. Om radioaktiva ämnen skulle ta sig ut ur en otät kapsel ska transporten fördröjas. Samtliga barriärer bidrar till den fördröjande funktionen. En delvis skadad kopparkapsel kan effektivt bidra till fördröjningen genom att försvåra in- och utflöde av vatten. Bentonitbufferten har en förmåga att hålla kvar många av de långlivade radioaktiva ämnena genom att dessa fastnar på lerpartiklarnas yta. Berget bidrar till fördröjningen genom att vattenomsättningen är liten på så stora djup. Dessutom kan radioaktiva ämnen fastna på spricktytor eller tränga in i mikrosprickor med stillastående vatten.

Utvecklingen av KBS-3-metoden har pågått sedan slutet av 1970-talet. Metoden redovisades första gången i en rapport 1983 som underlag för beslutet om att ta de senast byggda kärnkraftreaktorerna i drift /1-3/. Den har sedan legat till grund för SKB:s program för forskning och utveckling, samtidigt som andra metoder studerats översiktligt.

Djupförvaret består i sin grundutformning av en nedfartstunnel, schakt, centralområde samt en rad deponeringstunnlar, se figur 1-7. I varje deponeringstunnel finns ett antal deponeringshål. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen, bestäms bland annat med hänsyn till att temperaturen inte får överstiga 100 °C på kapslarnas yta. Efter att kapslarna placerats i deponeringshålen, omgivna av tätande bentonitlera, fylls tunneln igen med en blandning av bentonitlera och krossat berg. Även övriga utrymmen fylls igen när allt bränsle har deponerats.

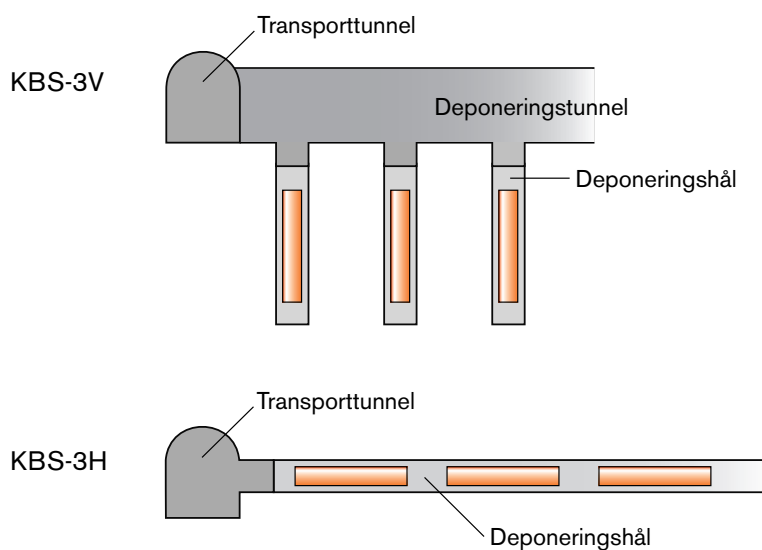


Figur 1-6. KBS-3-metoden bygger på att olika barriärer (kapseln, bufferten och berget) hindrar de radioaktiva ämnena i bränslet från att skada människa och miljö.



Figur 1-7. Djupförvarets grundutformning.

En alternativ utformning av KBS-3-förvaret, som har funnits med i bilden sedan början på 1990-talet, är horisontell deponering. Den innebär att kapslarna deponeras i långa horisontella hål i stället för korta vertikala hål, se figur 1-8. Volymen berg och återfyllning i djupförvaret skulle då minska betydligt, eftersom deponeringstunnlarna inte behövs. Utvecklingen av bergborrningstekniken har nu kommit så långt att denna utformning blivit ett intressant alternativ till vertikal deponering. Utvecklingen av horisontell deponering, KBS-3H, bedrivs därför parallellt med arbetena med vertikal deponering, KBS-3V, under de närmaste åren.



Figur 1-8. Principen för vertikal respektive horisontell deponering.

Lokalisering

Arbetet med att finna en lämplig plats för djupförvaret pågår. Under 2002 inleddes platsundersökningar i Östhammars och Oskarshamns kommuner. De platser som valts ligger i närheten av Forsmarksverket och Oskarshamnsverket. Det inledande skedet av platsundersökningarna pågår under omkring två år och omfattar markundersökningar och borrhning av undersökningshål ner till en kilometers djup. Resultatet från inledningsskedet ligger sedan till grund för preliminära säkerhetsbedömningar, som kan leda till att undersökningarna på en plats avbryts i förtid om platsen inte bedöms ha potential för att fylla kraven. Under platsundersökningsskedet upprättas beskrivande modeller för geologi, grundvattenströmning och biosfär för varje plats. Dessa utgör underlag för att analysera den långsiktiga säkerheten för djupförvaret.

SKB:s mål för platsundersökningsskedet är att få de tillstånd som behövs för att lokalisera och bygga djupförvaret och inkapslingsanläggningen. För djupförvaret ska sedan byggskedet kunna inledas på den valda platsen. Huvuduppgiften för SKB under de kommande åren är att ta fram underlag för ansökningarna, genomföra samråd och utarbeta miljökonsekvensbeskrivningar (MKB) enligt kraven i lagen. Tillstånds- eller tillåtlighetsprövning sker i första hand enligt Kärntekniklagen, Miljöbalken och Plan- och Bygglagen. Till ansökningarna ska bifogas ett MKB-dokument. Detta dokument ska identifiera och beskriva de direkta och indirekta effekter som den planerade verksamheten kan medföra på människor, miljö och samhälle. MKB-dokumentets omfattning och avgränsningar tas fram inom ramen för de samråd som genomförs.

1.4 Slutförvar för låg- och medelaktivt avfall

Volymerna av kortlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att öka när kärnkraftverken rivs. SKB bedömer att en utbyggnad av SFR är den bästa lösningen för denna avfallstyp. En sådan utbyggnad behöver inte vara klar förrän rivningen av kärnkraftverken är påbörjad.

Om kärnkraftverken fortfarande är i drift i mitten av 2020-talet kan en utbyggnad av den befintliga SFR-anläggningen bli aktuellt för att ta om hand den ökande mängden driftavfall.

Annat långlivat avfall mellanlagras i dag i Clab, vid kärnkraftverken och i Studsvik. Volymen är än så länge liten, men ökar successivt och kommer att öka ytterligare när kärnkraftverken rivs. För att avlasta Clab kommer SKB enligt planerna att mellanlagra denna avfallstyp under torra förhållanden. Detta kan ske i ett bergtrum i Simpevarp och senare även i SFR. Enligt nuvarande planering behöver inte mellanlagret stå klart förrän omkring år 2020. Ett slutförvar behövs cirka 25 år senare.

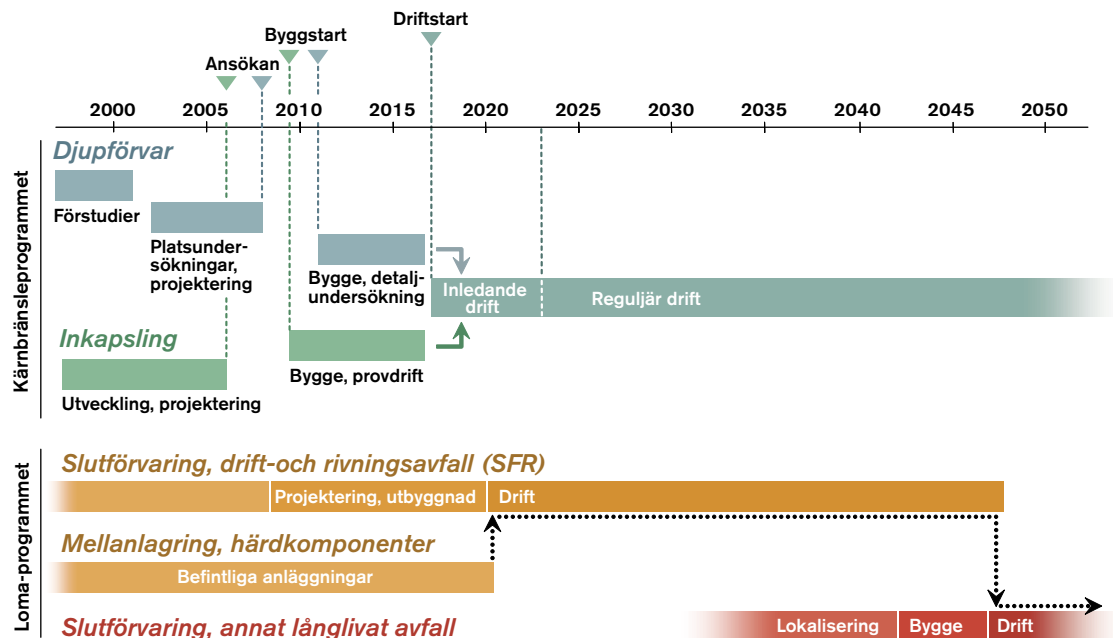
2 Handlingsplan

Planeringen för de framtida anläggningarna kan delas in i två delar: kärnbränslesystemet respektive avfallssystemet för låg- och medelaktivt avfall (Loma). För den aktuella programperioden 2004–2009 ligger tyngdpunkten i arbetet på kärnbränsleprogrammet. Planering och utbyggnad av återstående delar i Loma-systemet beror på när det blir aktuellt att riva kärnkraftverken.

I det yttrande över Fud-program 2001, som SKI lämnade till regeringen i mars 2002, efterfrågade myndigheten en redogörelse som tydligare klargjorde planering för återstoden av kärnavfallsprogrammet. Som huvudmotiv för denna begäran angav SKI att berörda myndigheter måste få klarlagt vilka granskningar som förväntas komma under de närmaste tio åren och hur dessa beror av varandra. Med detta som utgångspunkt framförde regeringen i ett beslut från december 2002 att man ”förutsätter att SKB för en dialog med berörda myndigheter och kommuner och att en redogörelse för SKB:s tidsplan med tillhörande handlingsplan rörande en säker slutförvaring av kärnavfallet ingår i Fud-program 2004”.

Mot denna bakgrund påbörjade SKB ett arbete för att uppdatera den egna planeringen och ta fram det av myndigheterna begärda underlaget. En milstolpe passerades under våren 2003, när SKB fattade beslut om att revidera tidsplanen för kärnbränsleprogrammet. Motsvarande revidering har senare gjorts av programmet för låg- och medelaktivt avfall. De planer som har tagits fram har redovisats vid olika samrådstillfällen. Figur 2-1 visar SKB:s plan för återstoden av det svenska kärnavfallsprogrammet.

En översiktlig beskrivning av SKB:s planer för verksamheten finns i avsnitt 2.1 (kärnbränsleprogrammet) och 2.2 (Loma-programmet). Bilaga A innehåller den fullständiga planen. Planerna för den forsknings-, utvecklings- och demonstrationsverksamhet som behövs för att genomföra programmen redovisas i kapitel 4–25.



Figur 2-1. Plan för återstoden av det svenska kärnbränsleprogrammet.

2.1 Kärnbränsleprogrammet

I Sverige är avsikten att genomföra geologisk deponering av det använda kärnbränslet. Bakom valet ligger bland annat värderingen att det är de generationer som lever i dag som också ska ta hand om avfallet. Skälet till detta är dels att det är dagens generationer som dragit nytta av kärnkraften, dels att det finns en osäkerhet när det gäller den framtida samhällsutvecklingen.

SKB:s fortsatta arbete med att ta hand om det använda kärnbränslet bygger på följande grundförutsättningar:

- Ett stegvis upplagt program för att genomföra djup geologisk deponering av använt bränsle.
- Ett fortsatt aktivt program för forskning och utveckling av teknik och säkerhet för djupförvarsmetoden, men även för alternativa metoder.

Det kommer att ta ytterligare minst 50 år att genomföra alla de åtgärder som behövs för att ta hand om allt högaktivt kärnavfall på ett långsiktigt säkert sätt. Det är därför lämpligt att gå fram i steg och hålla öppet för teknisk utveckling, förändringar och möjligheter att återta redan deponerat avfall. Då finns det handlingsfrihet för framtiden, samtidigt som djupförvarsmetoden demonstreras i full skala och under verkliga förhållanden. Även besluten om lokalisering, bygge och drift av en inkapslingsanläggning och ett djupförvar tas i steg och baseras på ett successivt mer detaljerat underlag.

Planeringen för kärnbränslesystemet baseras på ett referensscenario med 40 års drift av de reaktorer som nu är i drift. Det ger upphov till omkring 4 500 kapslar, motsvarande 9 300 ton uran. Planen innebär att deponeringen i djupförvaret kan avslutas omkring år 2050. De olika förvarsdelarna kan då vara förslutna och byggnaderna avvecklade före år 2060. Om drifttiden för kraftverken utsträcks till 60 år tillkommer drygt 1 500 kapslar och drifttiden för systemet utsträcks med cirka 20 år. Programmet medger att såväl mindre som större bränslemängder (jämfört med referensscenariot) hanteras. De variabler som påverkas är i huvudsak systemets drifttid och utrymmesbehovet för djupförvaret.

Lokaliseringen av de återstående anläggningarna bygger även den på en stegvis process med väl underbyggda och förankrade beslut. Processen är öppen för samhällets insyn och ger berörda kommuner frihet att avgöra om de vill delta eller inte. Denna modell har visat sig leda framåt.

Utgångspunkten vid SKB:s planering för återstoden av kärnbränsleprogrammet är att fullfölja arbetet i bred samverkan med berörda parter. Det är därför nödvändigt att eftersträva en balans mellan de berättigade kraven på tid och utrymme för beslutsprocesserna och den kontinuitet och intensitet som måste finnas för att resultatet ska bli bra. Denna inställning förutsätts präglad arbetssättet även hos de aktörer som har huvudrollen i samband med tillståndsprocesserna.

2.1.1 Nuläge

Nuläget i kärnbränsleprogrammet kan sammanfattas i följande punkter:

- Utvecklingen av KBS-3-metoden befinner sig i ett skede där tester av delar av systemet i pilot- och fullskala är huvudinslaget. Aktiviteterna sker i stor utsträckning vid Kapsellaboratoriet och Äspölaboratoriet.
- Projektering av en inkapslingsanläggning pågår, samtidigt som utvecklingen av inkapslingstekniken drivs vidare. Inkapslingsanläggningen bör i första hand lokaliseras i anslutning till Clab. En placering vid ett eventuellt djupförvar i Forsmark kommer att studeras som ett jämförande alternativ.
- Det finns två kandidatplatser till vilka ett djupförvar kan lokaliseras: Forsmark i Östhammars kommun respektive Simpevarp/Laxemar i Oskarshamns kommun.

- Undersökningar och projektering av ett djupförvar pågår på båda dessa platser. I ett senare skede kommer SKB att ansöka om att förlägga djupförvaret till en av platserna.
- Både inkapslingsanläggningen och djupförvaret kräver tillstånd enligt Miljöbalken och Kärntekniklagen. Lagstadgade samrådsförfaranden för detta har inletts. De kommande beslutsprocesserna är relativt väl definierade.

Med detta som grund har SKB uppdaterat handlingsplanerna för återstoden av programmet. Huvudmålet är att kunna ta hela systemet, inklusive de återstående anläggningarna, i drift. Viktiga delmål är att få de tillstånd som behövs för att etablera inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

2.1.2 Planering

Det övergripande målet för SKB:s arbete med att ta hand om det använda kärnbränslet är att inkapslingsanläggningen och den första etappen av djupförvaret ska färdigställas 2017, se figur 2-1. En period med inledande drift kan då påbörjas. Under denna fas deponeras mellan 200 och 400 kapslar med använt kärnbränsle. Den inledande driften ska också fungera som en slutprovning och demonstration av metoden.

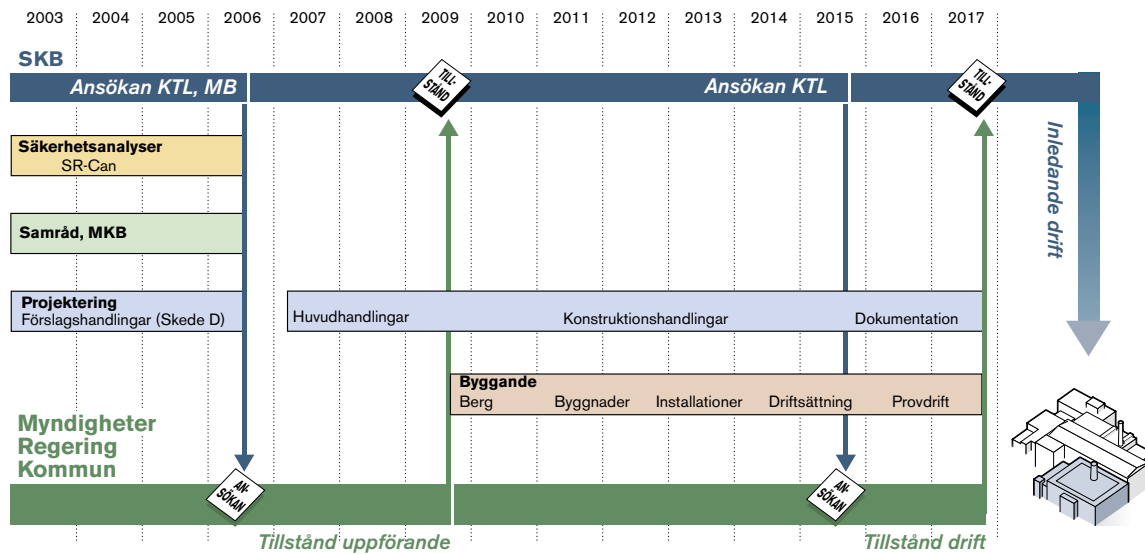
Efter utvärdering av den inledande driften som ger stöd för övergång till reguljär drift bör denna kunna inledas omkring år 2023. Kommer den reguljära driften igång senare räcker inte lagringskapaciteten i Clab och anläggningen måste byggas ut. Om den sista reaktorn tas ur drift omkring år 2025 kan de sista kapslarna deponeras i djupförvaret omkring år 2050. Deponeringstakten under den reguljära driften blir då ungefär 160 kapslar per år i medeltal. Hela programmet kan då avslutas omkring år 2060.

Planen har reviderats något jämfört med föregående Fud-program. Tidsplanen som överblickar ett så långt tidsperspektiv rymmer naturligtvis många osäkerheter. Den utgör dock en grund för beslut om inriktning och prioriteringar för de närmaste åren och uppdateras när bättre underlag finns. En given grundförutsättning för genomförandet är att dagens breda stöd för djupförvarsprogrammet består.

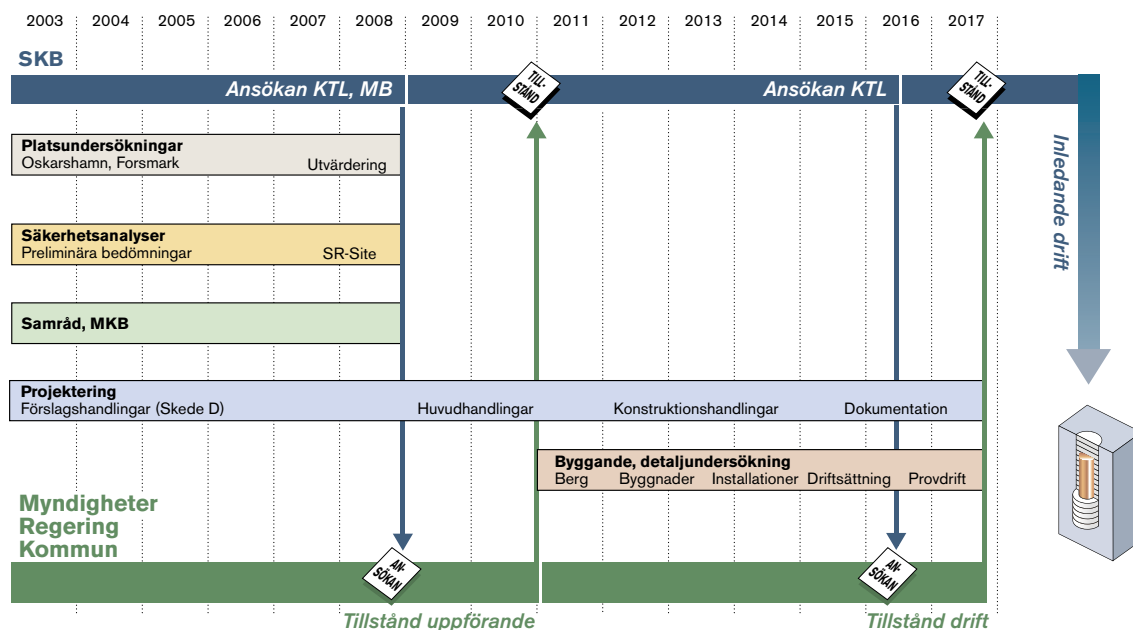
För perioden fram till slutet av år 2008 är målet att kunna lämna in tillståndsansökningar för inkapslingsanläggningen och djupförvaret, se figur 2-2. Förutsättningarna för att detta ska kunna förverkligas är:

- Ansökan om att få uppföra en inkapslingsanläggning förutsätter att denna förläggs i anslutning till Clab. Om lokaliseringen vid Clab faller bort som huvudalternativ måste tidsplanen revideras. Andrahandsalternativet är en lokalisering till Forsmark. Detta förutsätter emellertid att även djupförvaret förläggs till denna plats.
- De två platsundersökningarna för djupförvaret genomförs inom planerad tidsram, det vill säga till mitten av år 2007. Resultatet av undersökningarna ska också vara sådant att det motiverar en ansökan om att få uppföra djupförvaret på någon av platserna. Om en lokalisering till någon av dessa platser inte är möjlig och programmet måste utökas med flera platser innebär detta att tidsplanen revideras.
- Utvecklingen av tekniken för inkapsling och djupförvaring drivs vidare i den takt som planeras och med de framsteg som förväntas. Oväntade svårigheter på någon kritisk punkt kan medföra förseningar och revideringar.

Inkapslingsanläggning



Djupförvar



Figur 2-2. Planer för inkapslingsanläggningen och djupförvaret 2004–2017.

Det som styr SKB:s planering i det korta perspektivet är tidsåtgången för platsundersökningarna och det platsanknutna underlag (anläggningsutformning, säkerhetsanalys, MKB) som bygger på resultaten från dessa. Att ta fram och sammanställa detta underlag är en för SKB prioriterad verksamhet. Planeringen måste också ta hänsyn till kopplingen mellan anläggningarna. För SKB:s del innebär detta att framtagandet av underlag måste koordineras på viktiga punkter. Med hänsyn till byggtider för anläggningar bör tillståndsprocessen för inkapslingsanläggningen ligga något före djupförvaret i tiden. En stor del av det underlag som ska tas fram inför ansökan om inkapslingsanläggningen har relevans också för djupförvaret. Tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen ska enligt planerna lämnas in i mitten av 2006 och för djupförvaret i slutet av 2008, se figur 2-3.

Tidsåtgången för prövning av dessa ansökningar påverkas av flera faktorer:

- Kvaliteten på SKB:s underlag.
- Myndigheternas och miljödomstolens resurser och beredskap för att hantera och koordinera ärendena.
- De politiska instansernas beredskap att vilja fatta de slutliga besluten.

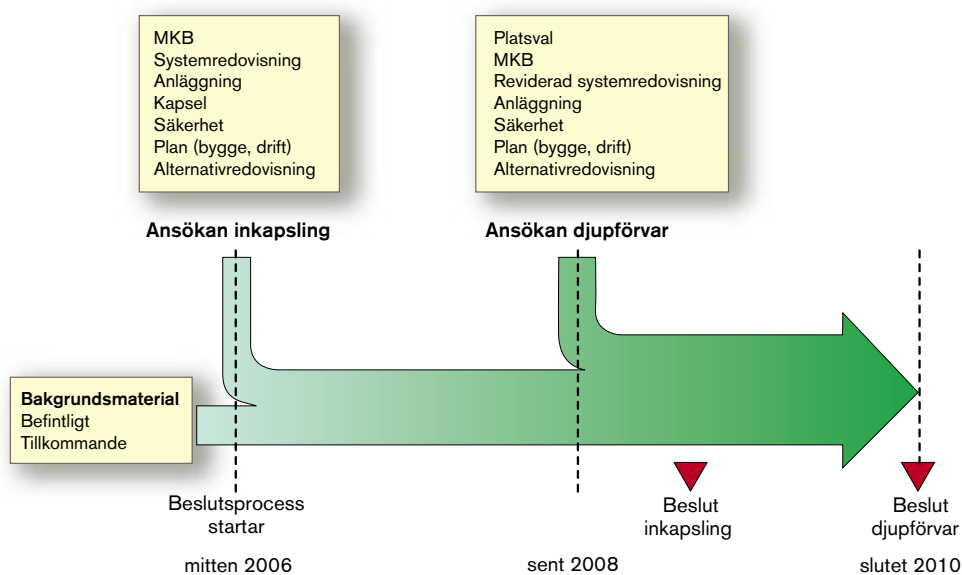
Figur 2-3 visar vad som kan vara en rimlig uppläggning och tidsåtgång för prövningsprocessen. Ärendet inleds med SKB:s ansökan om inkapslingsanläggningen i mitten av 2006 och tidsutrymmet för prövningarna bedöms till totalt cirka 4,5 år.

Ansökan om inkapslingsanläggningen kommer förutom en ingående redovisning av anläggningen, dess säkerhet och miljökonsekvenser också att omfatta:

- En redovisning av alternativa metoder för att ta hand om använt bränsle.
- En heltäckande systemanalys för inkapsling, transporter och djupförvar.
- En analys av den långsiktiga säkerheten för inkapslat bränsle i ett djupförvar.

Beslutet om inkapslingsanläggningen förutsätts inte kunna fattas förrän en tid (uppskattningsvis cirka nio månader) efter det att ansökan för djupförvaret också lämnats in, varvid SKB:s val av plats och en fullständig säkerhetsanalys för denna finns tillgänglig för alla berörda. Prövningen av djupförvarsärendet bör, enligt SKB, underlättas väsentligt av att granskningen av inkapslingsanläggningen (som levererar den produkt som ska förvaras i djupförvaret) har kunnat pågå i två år när prövningen av djupförvaret inleds.

Vidare bör noteras att i enlighet med regeringens beslut angående SKB:s samlade redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet utgör KBS-3-metoden planeringsförutsättning för platsundersökningarna. Ett slutligt godkännande av en viss metod för slutförvaring görs inte förrän i samband med ett ställningstagande till de kommande tillståndsansökningarna. För att ge nödvändigt underlag till ett sådant ställningstagande kommer SKB, som framgår ovan, att i ansökan för inkapslingsanläggningen och tillhörande miljökonsekvensbeskrivning redovisa genomgång och utvärdering av alternativa metoder för hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle. Detta innebär att myndigheter och regeringen kan ta ställning till SKB:s metodval i samband med att ansökan för inkapslingsanläggningen prövas.



Figur 2-3. Ansökningar och beslutsprocess för inkapslingsanläggning och djupförvar.

2.2 Loma-programmet

Delar av systemet för hantering av låg- och medelaktivt avfall har varit i drift sedan 1980-talet. Det gäller till exempel slutförvaringen av olika typer av kortlivat låg- och medelaktivt avfall i SFR i Forsmark. Erfarenheterna från denna verksamhet ger en god kunskapsbas inför de steg som återstår att ta.

SKB kommer att få en viktig roll i arbetet med att riva de svenska kärnkraftverken. Kraftföretagen har huvudansvaret för att riva själva anläggningarna, medan det är SKB som ska ta hand om avfallet. Till dess måste vi ha anpassat transportsystemet och byggt ut SFR. Som sista steg behövs också ett slutförvar för annat långlivat avfall.

2.2.1 Nuläge

Nuläget i Loma-programmet kan sammanfattas i följande punkter:

- Kortlivat låg- och medelaktivt driftavfall slutförvaras i SFR.
- Långlivat låg- och medelaktivt avfall mellanlagras i dag i Clab, vid kärnkraftverken och i Studsvik. Volymen är än så länge liten men kommer att öka, särskilt när kärnkraftverken rivs.
- Hittills har det inte varit aktuellt med några mer omfattande rivningsprojekt i Sverige. Mycket går emellertid att lära från ombyggnader av kärnkraftverken. I och med att Barsebäck 1 stängdes har dock planeringen för en framtida rivning tagit mer konkreta former.
- Sedan mitten av 1980-talet följer SKB vad som sker internationellt på rivningsområdet, såväl när det gäller teknikutveckling som forskning.

2.2.2 Planering

Inför rivningen av kärnkraftverken behövs ytterligare förvarsutrymmen för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. De avfallstyper som då blir aktuella liknar de som uppkommer i samband med drift och revisionsarbeten på kärnkraftverken och slutförvaras i SFR. En utbyggnad av denna anläggning för kortlivat rivningsavfall förutsågs i samband med planering och tillståndsprövning och bedöms fortfarande vara den bästa lösningen för detta avfall. En utbyggnad av SFR för att ta hand om rivningsavfall behöver inte vara klar förrän rivningen av kärnkraftverken är påbörjad. Om kärnkraftverken drivs i 40 år behöver de första av dessa utrymmen tas i bruk tidigast år 2020.

Driften och rivningen av kärnkraftverken ger upphov till mindre mängder annat långlivat avfall, till exempel hårdkomponenter. Dessa mellanlagras i dag i Clab. För att avlasta Clab (och för att undvika en ytterligare utbyggnad) planerar SKB att mellanlagra hårdkomponenter under torra förhållanden. Särskilda kollin och transportbehållare behöver tas fram för detta ändamål.

Ingjutningen inför slutdeponeringen tar maximalt tio år att genomföra. Detta arbete kan inte påbörjas för tidigt om det ska bli effektivt. Att vänta några tiotals år gör också att arbetet med slutbehandling förenklas genom att radioaktiviteten, som till stor del består av kobolt-60, klingar av. Ytterligare en fördel är att man behåller en viss frihet när det gäller utformningen av avfallsbehållarna. Om mellanlagringen av bränslet pågår till omkring år 2050 behöver inte slutförvaret för annat långlivat avfall (som hårdkomponenter med mera) vara i drift förrän tidigast omkring år 2045.

Lokaliseringen av ett förvar för annat långlivat avfall behöver därmed inte aktualiseras förrän omkring år 2035. Bergrum för denna avfallstyp kan då lokaliserars antingen till SFR, djupförvaret för använt kärnbränsle eller till annan plats.

En närmare beskrivning av planeringen redovisas i bilaga A. I kapitel 24 och 25 redovisas insatserna under den kommande Fud-perioden.

3 Fud-program

Den långsiktiga säkerheten för de olika förvarsanläggningarna står i centrum för SKB:s arbete med forskning, utveckling och demonstration. Säkerheten utvärderas med säkerhetsanalyser, som enkelt uttryckt kan sägas bestå i att först noggrant beskriva tillståndet i förvarsanläggningen vid någon initial tidpunkt och sedan kartlägga vilka förändringar som kan tänkas ske i förvaret samt beskriva konsekvenserna för människa och miljö.

Det råder ett ständigt samspel mellan säkerhetsanalys, forskning och förvarsutformning. Säkerhetsanalysen baserar sig på en given förvarsutformning och på kunskapen om de långsiktiga förändringarna i förvarsmiljön som forskningen levererar. Resultatet av säkerhetsanalysen kan användas till att prioritera nya forskningsinsatser och som beslutsunderlag vid utformningen av anläggningen. Nya material eller tillverkningstekniker kan föranleda ytterligare behov av forskning eller analyser.

3.1 Fud-program 2004 – kärnbränsle

De tekniska lösningarna för att ta hand om använt kärnbränsle kan utformas på en rad olika sätt. SKB:s mål är att tillhandahålla sådana som är säkra, kostnadseffektiva och ger så liten påverkan på människa och miljö som möjligt. Samhällets alla krav på skydd för hälsa och miljö ska uppfyllas. SKB:s existerande anläggningar uppfyller dessa mål. Djupförvaret och inkapslingsanläggningen ska göra detsamma.

SKB:s huvudsakliga insatser när det gäller Fud-programmet för använt kärnbränsle kan delas in i två huvudområden: teknikutveckling samt säkerhetsanalys och forskning. I avsnitt 3.1.1 och 3.1.2 ges mycket korta översikter av dessa. Det fullständiga programmet för använt kärnbränsle återfinns i kapitel 4–23.

3.1.1 Teknikutveckling

Ett djupförvar enligt KBS-3-metoden bygger på att kopparkapslar med använt kärnbränsle deponeras, inbäddade i en buffert av bentonitlera, på 400–700 meters djup. Djupförvaret kan se ut på flera sätt. Den slutliga utformningen påverkas dels genom att de tekniska systemen optimeras, dels genom anpassning till de rådande geologiska förhållandena på platsen. Samtidigt ska kraven på säkerhet uppfyllas. Detta gäller såväl under uppförande och drift som långsiktigt för det förslutna förvaret. SKB:s mål för den kommande Fud-perioden är i första hand att ta fram underlag till en ansökan om att få uppföra en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab.

Kapslarna, i vilka det använda kärnbränslet ska deponeras, är dimensionerade för att motstå det tryck den kommer att utsättas för i förvaret. Kopparkapseln ska motstå korrosionsprocesser så att den är tät i ett 100 000-årsperspektiv. I referensutformningen består kapseln av en gjuten insats av segjärn och ett kopparkärl med fem centimeters tjocklek. Arbetet med att detaljkonstruera samt utvärdera tillverknings-, förslutnings- och provningsmetoder för kapseln fortsätter. Mycket av detta arbete utförs vid Kapsellaboratoriet.

Erfarenheterna från Kapsellaboratoriet kommer att påverka den slutliga utformningen av inkapslingsanläggningen. Under de närmaste åren ska vi göra en systematisk genomgång av inkapslingsprocessen och införa förbättringar och förenklingar där så är möjligt. Detta arbete ska sedan ligga till grund för en tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen.

Den nuvarande referensutformningen av djupförvaret är generell och ska anpassas till förhållandena på de platser i Oskarshamns och Östhammars kommuner där platsundersökningar pågår. I det fortsatta arbetet ska vi bland annat studera hur olika förvarsutformningar samt hur olika buffert- och återfyllningsmaterial påverkar säkerheten och den yttre miljön. Barriärerna

kan också dimensioneras olika och deponeringsdjup och layout kan variera. Vi vill bevara dessa frihetsgrader så länge som möjligt, eftersom det ger ökad flexibilitet och större möjligheter att ta tillvara den tekniska utveckling som sker.

Under de kommande åren utreds horisontell deponering av kopparkapslarna som ett alternativ till vertikal deponering, se avsnitt 11.4. Det slutliga valet av deponeringsmetod ska baseras på en utvärdering av säkerhet, teknik, kostnader och miljöaspekter.

3.1.2 Säkerhetsanalys och forskning

Målet med den forskning om långsiktig säkerhet, som SKB bedriver, är att vi ska förstå de processer (förändringar på lång sikt) som förekommer i ett djupförvar och hur de påverkar förvarets förmåga att isolera det använda kärnbränslet. De resultat som forskningen levererar används sedan i de säkerhetsanalyser som SKB regelbundet genomför. För närvarande pågår arbetet med SR-Can, den säkerhetsanalys som är en del av underlaget inför ansökan om att få bygga inkapslingsanläggningen. Därefter kommer ytterligare en säkerhetsanalys, SR-Site, att bifogas ansökan om att få bygga djupförvaret.

En nyhet i SKB:s forskningsprogram jämfört med tidigare år är att vi startat ett program för samhällsvetenskaplig forskning. Detta har föranletts av remissinstansernas granskning av Fud 2001. Bland annat ville ett flertal kommuner, universitet och intresseorganisationer att Fud-programmets tekniska och naturvetenskapliga inriktning skulle kompletteras med en samhällsvetenskaplig del med forskning om exempelvis attityder, beslutsfattande i komplicerade samhällsfrågor och samhällsutveckling på lång sikt. Det finns fyra generella forskningsområden med relevans för avfallsfrågan som SKB avser att stödja:

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

Huvudinriktningen ska vara tillämpad forskning. Resultaten ska kunna omsättas i praktisk tillämpning, men det kan även finnas ett gränssnitt mot grundforskningen. Vidare ska SKB:s forskningsområden, platsanpassade studier och utredningar ha tydliga kopplingar sinsemellan och förstärka varandra.

3.2 Fud-program 2004 – Loma

De anläggningar som omfattas av Loma-programmet är de svenska kärnkraftverken samt SKB:s anläggningar. Utöver detta kan SKB komma att ta om hand radioaktivt avfall från Studsvik, Bränslefabriken i Västerås, Ranstad och Ågesta. Detta ligger utanför SKB:s åtagande gentemot ägarna och kräver därför att egna avtal tecknas.

3.2.1 Rivning

I Sverige förutsätts rivning av kärnkraftverken ske relativt snart efter det att det använda bränslet transporterats bort från anläggningen. Den största mängden avfall som fås vid rivningen är konventionellt byggmaterial, som inte är radioaktivt över huvud taget. Av det radioaktiva materialet är en stor del mycket lågaktivt. Efter rengöring eller smältning kan en del av detta återanvändas. Hur stor andel det rör sig om beror dels på hur säkra de mätmetoder är som används, dels på vilka regler för friklassning som tillämpas. I dag finns inga generella regler, utan myndigheterna avgör från fall till fall.

Det avfall som inte friklassas ska tas om hand i särskilda slutförvar. Det kortlivade avfallet ska enligt planerna deponeras i en utbyggnad till SFR. Långlivat avfall måste deponeras på ett större djup än kortlivat. I kapitel 24 finns en redogörelse för SKB:s arbete med rivningsfrågor under den kommande programperioden.

3.2.2 Loma

Forskningsinsatserna när det gäller låg- och medelaktivt avfall syftar främst till att ta fram data och modeller för att analysera den långsiktiga säkerheten i ett förvar för långlivat avfall. Under den kommande Fud-perioden kommer SKB speciellt att undersöka hur den alkaliska miljö som betong ger upphov till påverkar transporten av radioaktiva ämnen. Programmet beskrivs i sin helhet i kapitel 25.

En första inledande säkerhetsanalys av ett slutförvar för annat långlivat avfall genomfördes 1999 /3-1/. När platsundersökningarna för djupförvaret har genomförts 2007 kommer det att finnas tid och resurser för en ny analys. Den exakta tidpunkten kommer att väljas med hänsyn till övriga säkerhetsanalyser och resurser.

3.3 Fud-program 2004 – internationellt samarbete

Det internationella samarbetet kring Äspölaboratoriet har pågått i mer än tio år och varit en god grund för SKB:s samverkan med systerorganisationer i andra länder. På senare år har SKB också utvecklat deltagandet i EU-projekt. Inom EU:s femte ramprogram har SKB deltagit i 18 olika projekt och svarat för ledningen av tre av dessa.

Det största projektet har varit etableringen av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Detta arbete avslutades 2003 i och med att försöksområdet förseglades. Information samlas nu in från över 1 000 mätinstrument. Parallellt fortsätter modelleringen med jämförelser mellan de prognoser över processer och skeenden som de matematiska modellerna indikerat och den verkliga utvecklingen i Prototypförvaret

Inom EU:s sjätte ramprogram kommer SKB att medverka i följande projekt:

- Esdred, som utvecklar och testar olika deponeringsmetoder samt metoder för att bygga och försluta ett geologiskt förvar på ett säkert sätt.
- NF-Pro, som undersöker närområdets betydelse för den långsiktiga säkerheten.
- Red-Impact, som ska uppskatta mängder och typer av avfall från separation och transmutation av använt bränsle samt kostnaderna för och även andra aspekter av en sådan hantering.

Sverige och Finland har ungefär samma förutsättningar när det gäller slutförvaring av det använda kärnbränslet och båda länderna planerar att använda samma metod. Mot den bakgrunden har SKB och dess finska motsvarighet Posiva avtalat om ett ingående samarbete. Posiva har valt plats för det finska slutförvaret och har i år påbörjat den första etappen av bygge och detaljundersökningar. Posiva och SKB har ett långtgående samarbete när det gäller kapseltillverkning och förslutningsteknik. Den viktigaste gemensamma frågan är att göra tillverkningsprov med olika metoder hos olika leverantörer.

SKB har bilateralavtal om informationsutbyte med organisationer i åtta länder: Finland, Japan, Kanada, Schweiz, Spanien, Storbritannien, Tyskland och USA. Särskilda avtal om samarbete kring experimenten i Äspölaboratoriet finns med organisationer i sex länder: Finland, Frankrike, Japan, Kanada, Spanien och Tyskland.

Det internationella samarbetet som rör Äspölaboratoriet koordineras i en International Joint Committee (IJC). För att ge råd och synpunkter på program och resultat ordnas Technical Evaluation Forums (TEF) i samband med IJC:s sammanträden. Det praktiska samarbetet sker

genom att organisationerna har personal på platsen och deltar i genomförandet av olika experiment. Flera av de deltagande länderna har startat undersökningar och experiment utöver de som ingår i SKB:s program.

Samarbetet gör det möjligt att samla världens främsta experter inom många olika områden för att utbyta idéer och erfarenheter om frågor av betydelse för geologisk deponering av radioaktivt avfall. Ett exempel på detta är det samarbete som genomförs i arbetsgrupper, så kallade Task Forces, med medlemmar från de deltagande organisationerna. Sådana arbetsgrupper finns för modellering av grundvattenströmning och transport och för modellering av tekniska barriärer. Resultatet av det internationella samarbetet redovisas i en separat rapportserie, Äspö International Progress Reports.

3.4 Kommande Fud-program

Under den kommande programperioden planerar SKB att söka tillstånd för en inkapslingsanläggning och har därför i Fud-program 2004 satt utveckling av inkapslingstekniken i centrum. Detta görs för att redovisa utvecklingsläget inom kapseltillverkning och förslutningsteknik samt för att få remissinstansernas granskningskommentarer inför denna ansökan. Redovisningen avser att visa att det finns metoder för de olika arbets- och kontrollmomenten som uppfyller uppställda kvalitetskrav och som kan utvecklas för att även tillgodose högt ställda krav på tillförlitlighet i processen.

Arbetet med att utveckla djupförvarstekniken och analysera den långsiktiga säkerheten pågår parallellt med arbetet med att utveckla inkapslingstekniken. I Fud-program 2007 kommer enligt planerna djupförvarstekniken att vara i centrum för redovisningen. Utvecklingen av metodiken för säkerhetsanalysen fortsätter. Närmast på tur står säkerhetsrapporten SR-Can. Den kommer att utgöra en del av underlaget i ansökan om inkapslingsanläggningen och är ett första steg mot den säkerhetsrapport som ska göras för den plats som väljs för djupförvaret. En planeringsrapport /3-2/ och en interimrapport /3-3/ har utarbetats och ska remissbehandlas av myndigheterna. Detta är ett viktigt steg för att få in synpunkter på metodiken för säkerhetsanalysen. Synpunkterna kan då tas tillvara i den slutliga versionen av SR-Can.

Avsikten är att Fud-rapporternas struktur ska lyfta fram de delar av verksamheten som är viktigast vid olika tidpunkter. Enligt planerna ska de kommande Fud-programmen inriktas mot följande delar av verksamheten, beroende på vilket skede SKB befinner sig i:

- Fud 2007 Djupförvarsteknik.
- Fud 2010 Loma-systemet.

Del II

Teknikutveckling

- 4 Översikt – teknikutveckling
- 5 Kapsel – tillverkning
- 6 Kapsel – förslutning
- 7 Kapsel – kvalificering
- 8 Kapsel – inkapsling
- 9 Transporter av inkapslat bränsle
- 10 Djupförvar – teknik
- 11 Djupförvar – projektering
- 12 Djupförvar – övervakning

4 Översikt – teknikutveckling

Utvecklingen av tekniken för KBS-3-metoden är nu i ett intensivt skede inför de kommande tillståndsansökningarna för inkapslingsanläggningen och djupförvaret. SKB:s strategi för arbetet är att fokusera på en referensutformning för var och en av de olika delarna i systemet. Vertikal deponering, KBS-3V, är referens för att utforma deponeringsområdet i berget. Arbetet med att utforma detaljerna följer en stegvis process, där de slutliga valen för olika delar görs så sent som möjligt för att de ska vara baserade på de senaste kunskaperna och utredningarna om alternativa utformningar. Horisontell deponering av kopparkapslarna, KBS-3H, är ett sådant alternativ. De slutliga valen baseras på en utvärdering av säkerhet, teknik, kostnader och miljöaspekter.

I kapitel 5–8 behandlas frågor som rör kapsel- och inkapslingsteknik. Kapitel 9 tar upp transporterna av inkapslat använt kärnbränsle mellan inkapslingsanläggningen och djupförvaret. Tekniken för att bygga och driva djupförvaret behandlas i kapitel 10, medan metodiken för att projektera detsamma beskrivs i kapitel 11. Slutligen tas långtidsobservationer och övervakning av djupförvaret upp i kapitel 12. I avsnitt 4.1–4.8 nedan finns korta sammanfattningar av programmen inom varje teknikområde.

4.1 Kapseltillverkning

Tillverkningen av kopparrör till kapslarna har provats med olika metoder som rullformning, extrusion, dornpressning och smide. Försöken visar att dessa metoder är användbara för att tillverka kopparrören. För att gjuta insatserna provas och utvärderas också olika metoder. Utvecklingsarbetet fortsätter för att förbättra tillverkningstekniken och SKB avser att i samband med ansökan för inkapslingsanläggningen redovisa vilka metoder som är tänkbara för den framtida serieproduktionen av kapslar. Det fullständiga programmet för kapseltillverkning och oförstörande provning av kapselkomponenter redovisas i kapitel 5.

Tillverkningen av kapslar kommer inte att ske på en enda plats. Insatserna gjuts vid olika gjuterier och kopparrören kommer förmodligen att tillverkas hos någon industri som har de erforderliga maskininstallationerna. Maskinbearbetning av insatser och kopparrör sker därefter på någon mekanisk verkstad eller i kapselfabriken, som är en särskild anläggning för sammansättning och slutkontroll av kopparkapslarna innan dessa levereras till inkapslingsanläggningen. Locken till insatserna och kopparlocken är också komponenter som tillverkas hos någon leverantör.

4.2 Förslutningsteknik

SKB arbetar i dag med att parallellt utveckla två svetsmetoder för att försluta kopparkapslarna: elektronstrålesvetsning och friction stir welding. Utrustningar för tester med båda metoderna finns i drift på Kapsellaboratoriet. Försöken visar att båda metoderna fungerar. Utvecklingsarbetet med förslutningstekniken fortsätter för att säkerställa att det finns minst en metod som uppfyller kvalitetskraven och att denna går att använda i serieproduktion.

Metoder för oförstörande provning, framför allt ultraljud och röntgenteknik, utvecklas också i Kapsellaboratoriet. Arbetet med detta och att fastställa acceptanskriterier kommer att fortsätta och redovisas inför tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. Programmet för förslutningsteknik för kapseln och oförstörande provning av förslutningssvetsen redovisas i kapitel 6.

4.3 Kvalificering

Innan inkapslingsanläggningen och kapsselfabriken tas i drift ska kvalificering (undersökningar som visar att metoderna uppfyller ställda krav) av metoder för tillverkning, svetsning och oförstörande provning av kapslar genomföras. Kvalificeringen ska ske mot relevanta kriterier. Ett program för kvalificering ska utarbetas och redovisas i anslutning till tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. Arbetet med kvalificering finns beskrivet i kapitel 7.

4.4 Inkapsling

I mitten av 1990-talet presenterade SKB en preliminär utformning av en inkapslingsanläggning byggd i anslutning till Clab /4-1/. Under de närmaste åren ska vi systematiskt gå igenom inkapslingsprocessen och införa förbättringar och förenklingar där sådana är möjliga. Erfarenheterna från Kapsellaboratoriet kommer att ligga till grund för den slutliga utformningen av inkapslingsanläggningen. Viktiga punkter när det gäller att bestämma hur inkapslingsprocessen ska se ut är att utveckla svetstekniken och provningstekniken.

SKB kommer att projektera anläggningen utifrån resultaten av ovanstående teknikutveckling. Projekteringen ska också samordnas med resultatet från MKB-arbetet samt de säkerhets- och systemanalyser som görs. Programmet för inkapsling återfinns i sin helhet i kapitel 8.

4.5 Transporter av inkapslat bränsle till djupförvaret

I mitten av 1990-talet utfördes en förstudie av en transportbehållare för kapslar med använt kärnbränsle. För närvarande pågår en uppdatering och mer detaljerad projektering av en sådan behållare. Till de nya transportbehållarna behövs anpassade lastbärare.

Driften av djupförvaret och inkapslingsanläggningen bygger på att transporter av förslutna kapslar kan pågå mer eller mindre kontinuerligt mellan de två anläggningarna. Eftersom inkapslingsanläggningen är dimensionerad för att försluta 200 kapslar per år, måste således också transportsystemet kunna hantera detta antal. Transporterna kommer att ske sjövägen om djupförvaret förläggs till Forsmark och landvägen om det förläggs till Oskarshamn. Kapitel 9 ger en mer fullständig bild av transporterna mellan inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

4.6 Djupförvarsteknik

Inför ansökan om att få lokalisera djupförvaret fortsätter arbetet med att välja metoder för att bygga och driva djupförvaret samt med att utforma olika delar av det. Utvecklingsarbetet omfattar i första hand:

- Bergbrytnings- och tätningsteknik för tunnlar.
- Tillverkning och inplacering av buffert.
- Hanteringsteknik för kapslar.
- Återfyllning och pluggning av deponeringstunnlar.

Ytterligare ett område, som studeras för närvarande, är rensning och tätning av borrhål. Undersökningshål från ytan och från tunnlar måste tätas senast i samband med att djupförvaret försluts. Teknik för att återta kapslar efter den inledande driften har utvecklats och ska provas i ett pågående fullskaleförsök i Äspölaboratoriet. Det fullständiga programmet för djupförvarsteknik återfinns i kapitel 10.

4.7 Projektering av djupförvaret

Den nuvarande referensutförningen av djupförvaret bygger på generiska data om svensk berggrund på 400–700 meters djup. Utformningen är generell och ska nu anpassas till förhållandena på de platser i Oskarshamns och Östhammars kommuner där platsundersökningar pågår. I det fortsatta arbetet ska vi bland annat studera hur olika förvarsutförningar, buffert- och återfyllningsmaterial påverkar säkerheten och den yttre miljön på de platser som ska undersökas.

Barriärerna kan också dimensioneras olika och deponeringsdjup och layout kan variera. SKB vill bevara dessa frihetsgrader så länge som möjligt, eftersom det ger ökad flexibilitet och större möjligheter att ta tillvara den tekniska utveckling som sker. Projekteringen bedrivs stegvis enligt en modell som utvecklats för kärnkraftverken och SKB:s nuvarande anläggningar Clab och SFR. Projekteringen baseras på teknikutvecklingen enligt ovan och samordnas med resultaten från platsundersökningarna, MKB-arbetet samt säkerhets- och systemanalyserna. Programmet för projektering presenteras i sin helhet i kapitel 11.

4.8 Långtidsobservationer

Djupförvaret ska konstrueras så att det är säkert även utan övervakning eller underhåll. Det krävs dock långtidsobservationer och mätningar för att öka den vetenskapliga förståelsen för platsen och förvaret. SKB har mot denna bakgrund utarbetat riktlinjer för att genomföra långtidsobservationer under platsundersöknings-, bygg- och driftskedena. Kraven på icke-spridningskontroll av klyvbart material (safeguards) och på fysiskt skydd av detsamma är höga. Arbetet pågår internationellt för att definiera kraven på safeguardsystemet för ett förslutet geologiskt förvar. När SKB utformar djupförvarsanläggningen kommer vi att utgå från tillsynsmyndigheternas krav och synpunkter när det gäller safeguards och fysiskt skydd. Kapitel 12 behandlar långtidsobservationer och övervakning.

5 Kapsel – tillverkning

I djupförvaret har kapseln till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen. Så länge kapseln är tät kommer inga radioaktiva ämnen ut ur den. För att uppnå isolering ska kapseln:

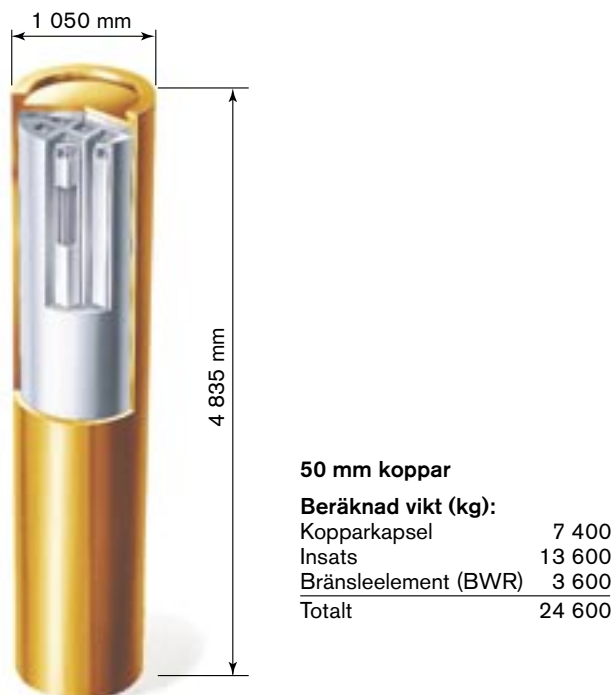
- Vara tät vid deponeringen.
- Vara beständig i den kemiska miljö som förväntas i djupförvaret.
- Tåla de mekaniska belastningar som förväntas i förvaret.

Dessutom ska den utformas på ett sätt som ger hög säkerhet under inkapsling, transport och deponering.

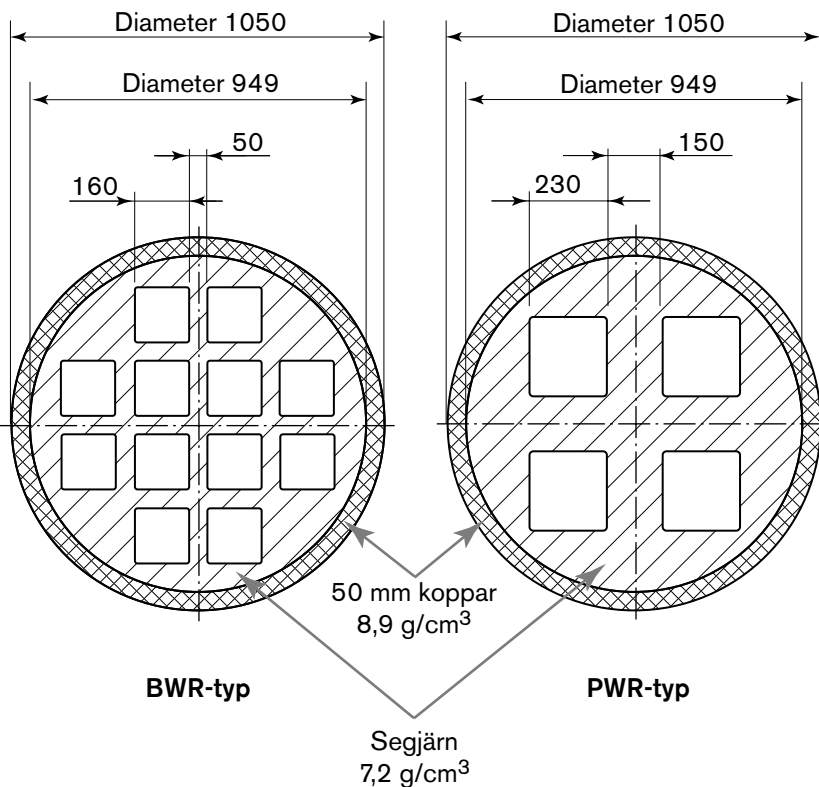
SKB:s referenskapsel består av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en tryckbärande insats av segjärn, se figur 5-1. Kapseln rymmer antingen tolv BWR-element eller fyra PWR-element. Diametern är drygt en meter och längden nästan fem meter. Den totala vikten, inklusive bränsle, är cirka 25 ton för en BWR-kapsel och cirka 27 ton för en PWR-kapsel.

Kopparmaterialet i höljet har en tillsats av ungefär 50 ppm fosfor för att öka materialets kryptuktilitet. Den tryckbärande insatsen tillverkas av segjärn. Avståndet mellan bränslekanalerna är fem centimeter och det minsta avståndet från bränslet till utsidan av insatsen är cirka fem centimeter, se figur 5-2.

En viktig milstolpe för inkapslingstekniken har uppnåtts genom att en kapsel i full skala har tillverkats och förslutits enligt kvalitetsplan.



Figur 5-1. Kopparkapsel med gjuten insats av järn för BWR-bränsle.



Figur 5-2. Tvärsnitt av kapseln. Alla mått är angivna i millimeter.

5.1 Konstruktionsförutsättningar

Konstruktionsförutsättningarna för kapseln redovisades första gången i Fud-program 98 /5-1/ och har fastställts i de övergripande konstruktionsförutsättningarna /5-2/. Dessa ligger till grund för arbetet med att utforma kapseln i detalj och innebär i korthet att:

- Kapseln ska motstå alla kända korrosionsprocesser så att den bedöms förbli intakt i djupförvaret under minst 100 000 år.
- Kapseln ska konstrueras för att klara de mekaniska påfrestningar som uppstår i ett djupförvar i granitiskt berg till 700 meters djup.
- Vid dimensioneringen ska också hänsyn tas till de belastningar som kan förväntas under en istid.
- Ytdosraten på kapselns utsida får inte överstiga 1 Gy/h.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI ser positivt på att SKB sammanställt kunskapsläget för kopparkorrosion. Som SKI tidigare framfört måste nästa steg vara att använda denna kunskap i säkerhetsanalysen och i arbetet med konstruktionsförutsättningarna, vars resonemang leder fram till dimensioneringen av koppartjockleken.

SKI ser de pågående arbetena med konstruktionsförutsättningar för förvaret, respektive acceptanskriterier för kapseln som mycket viktiga. Förseningar i dessa kan försena andra delar av kapselarbetet. Konstruktionsförutsättningarna bör fungera som styrande för många aktiviteter och kan behöva revideras efter de konsekvensanalyser som måste utföras för att visa att konstruktionsförutsättningar och acceptanskriterier är tillräckliga.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Sedan Fud 2001 har de övergripande konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret i KBS-3-systemet sammanställts /5-2/. Arbetet med att överföra konstruktionsförutsättningarna i databasform har också inletts, se avsnitt 11.2.1.

I konstruktionsförutsättningarna för kapseln /5-3/ betraktades eventuella extralaster från den överliggande inlandsisen under en istid som extremfall för vilket inga extra säkerhetsmarginaler krävdes.

Livstidsbedömningen /5-4/ visade att två millimeter vägg tjocklek är tillräckligt för att kapseln ska kunna få en livslängd på en miljon år. Experimentella studier /5-5/ och litteraturdata /5-6/ visar att ytskador inte ökar koppars känslighet för lokal korrosion. Tidigare utförda brottseghetsmätningar /5-7/ har visat att det inte heller finns risk för spricktillväxt. Acceptanskriterier för en kapsel, som förslutits med elektronstrålesvetsning, kommer att utformas utifrån denna information.

Program

Konstruktionsförutsättningarna för kapseln kommer att uppdateras inför ansökan om att få uppföra inkapslingsanläggningen.

Sedan 2002 pågår forskning, som syftar till att göra en probabilistisk analys av kapselns hållfasthet. Resultaten från detta projekt kommer att ligga till grund för att slutgiltigt bestämma kapselinsatsens dimensioner. Projektet ska enligt planerna avslutas under 2004. Resultaten avgör om ytterligare forskning och utveckling krävs under den kommande treårsperioden.

Man kan förvänta sig i stort sett samma korrosionsegenskaper i en svets utförd med friction stir welding som i en elektronstrålesvets och i grundmaterialet. Däremot saknas data för brottsegheten i en svets utförd med friction stir welding. Data för detta kommer att tas fram under den kommande treårsperioden.

5.2 Acceptanskriterier

Acceptansgränser är det generella begrepp som används för att beskriva inom vilka gränser olika parametrar, som har betydelse för kapselns funktion, måste hålla sig. I många fall är dessa gränser uttryckta i form av specifikationer, till exempel ritningsmått med toleranser för koppartjockleken. Vissa parametrar har dock mer komplext sammansatta gränser. Dessa parametrar benämns acceptanskriterier. Ett exempel på ett acceptanskriterium är tillåten förekomst av diskontinuiteter.

För att säkerställa att kapseln håller sig inom acceptansgränserna utvecklar vi metoder för kvalitetskontroll. Vissa kontrollmetoder är förhållandevis enkla och syftar till att säkerställa att kapseln uppfyller olika specifikationer. Ett exempel på detta är standardiserat mätförfarande för dimensionsmätning. Andra kontrollmetoder är mer komplicerade, både vad gäller utförande och tolkning av resultatet. Ett exempel på detta är oförstörande provning, där metoden måste ha hög tillförlitlighet för att kunna sortera bort kapslar som inte uppfyller de uppställda acceptanskriterierna, se vidare kapitel 7.

När SKB tar fram acceptanskriterier för tillåtna materialdefekter utgår vi från en kartläggning av vilka diskontinuiteter som kan uppstå i de olika processstegen vid tillverkning av kapseln (defektbeskrivningar) samt hur dessa påverkar kapselns förmåga att uppfylla konstruktionsförutsättningarna (skadetålighetsanalys). Kvantifieringen av acceptanskriterierna är komplex. Kriterierna ska primärt garantera den funktionella säkerheten hos kapseln. Samtidigt ska de svara mot tillverkningskvaliteten och möta kontrollmetodernas detektions- och upplösningsförmåga.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB:s slutsatser i Fud 2001 kan sammanfattas i följande punkter:

- Acceptanskriterier kommer att fastställas för kapselns alla delar, inklusive svetsarna. För bland annat svetsarna måste man med provmetoderna kunna avgöra om acceptanskriterierna är uppfyllda. SKB tar fram en härledning av acceptanskriterierna.
- Konsekvenser av större defekter än vad acceptanskriterierna anger utreds. Fastlagda acceptanskriterier avseende defekter måste kunna verifieras med oförstörande provning.
- Det pågående arbetet med att välja lämplig utrustning och metodik fortsätter.
- Erfarenheter från provtillverkningen av alla delar till kapseln kommer att tas tillvara och påverka den fortsatta utvecklingen av kapselfabriken. Arbetet med att utreda och fastlägga acceptanskriterier och provningsmetoder kommer att innebära att anpassad utrustning för oförstörande provning och övrig kvalitetskontroll kan specificeras mer exakt.

SKI ser de pågående arbetena med konstruktionsförutsättningar för förvaret och acceptanskriterier för kapseln som mycket viktiga. Förseningar i dessa kan försena andra delar av kapselarbetet. Konstruktionsförutsättningarna bör fungera som styrande för många aktiviteter. De kan behöva revideras efter de konsekvensanalyser som måste utföras för att visa att konstruktionsförutsättningar och acceptanskriterier är tillräckliga.

Arbetet med acceptanskriterier måste ges hög prioritet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Arbete pågår med att ta fram underlag för att bedöma de fel som kan uppstå vid de olika tillverkningsstegen för att tillverka kopparkapslar och gjutjärnsinsatser, samt för att slutligen försluta den färdiga kapseln i inkapslingsanläggningen. För förslutningssvetsar pågår ett projekt i samarbete med tyska Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) kring tillförlitligheten i oförstörande provning.

Utifrån kunskapen om korrosion av koppar i djupförvarsmiljö och kunskapen från brottseghetsmätningarna på koppar kan vi formulera preliminära kriterier för tillåtna diskontinuiteter i kopparhöljet, se avsnitt 5.1. Sammanfattningsvis gäller att en sammanhängande diskontinuitet från ytan och inåt, en så kallad ytbrytande diskontinuitet inte utgör något hot mot kapselns integritet i djupförvaret över långa tider. Korrosionsbedömningarna visar också att en koppartäckning på några millimeter är fullt tillräckligt för att garantera en livstid för kapseln på över en miljon år /5-4/. Det råder ännu viss osäkerhet kring hur ett eventuellt inflöde av syresatt vatten under kommande istider påverkar korrosionen. Vår bedömning är att en koppartäckning på 1,5 centimeter kommer att ge ett fullgott korrosionsskydd, även med hänsyn tagen till osäkerheter rörande konsekvenserna av istider. Som ett preliminärt kriterium för största tillåtna diskontinuitet, i såväl förslutningssvetsar som i kopparhöljet i övrigt, har SKB satt 3,5 centimeter i radiell utbredning. Detta innebär att minsta tillåtna koppartäckning är 1,5 centimeter vid en koppartjocklek på fem centimeter.

Som nämnts i avsnitt 5.1 pågår ett projekt kring probabilistisk analys av kapselns hållfasthet. Parallellt med detta projekt görs datorsimuleringar vid Svenska Gjuteriföreningen för att identifiera de områden i kapselinsatsen där sannolikheten för gjutfel är störst. En kartläggning av faktiska gjutfel i insatser och utprovning av metoder för oförstörande provning har också påbörjats. Dessa projekt kommer att ge underlag för att bedöma skadetåligheten hos insatsen och som följd av detta ge underlag till att fastställa acceptanskriterier.

Program

Arbetet med probabilistisk analys av kapselns hållfasthet kommer att slutföras under 2004. Resultaten kommer att ligga till grund för optimering av tekniska specifikationer och formulering av acceptanskriterier.

Ytterligare insatser för BWR-element kommer att gjutas och utvärderas mot dessa acceptans-kriterier. Insatser för PWR-element kommer också att tillverkas och analyseras.

5.3 Materialteknik

Kapselns utformning och val av material i de ingående komponenterna har baserats på konstruktionsförutsättningarna. Kapselns egenskaper och därmed också dess funktion i djupförvaret bestäms dels av dess utformning, dels av komponenternas materialegenskaper. I detta avsnitt kommer materialtekniska aspekter som kan relateras till tillverkningstekniken för kapselkomponenter att behandlas. I avsnitt 5.4 behandlas omfattningen och resultatet av utförd provtillverkning. För ytterligare detaljer hänvisas till /5-8/ och /5-9/.

Det finns detaljerade tekniska specifikationer, med bland annat preciserade materialkrav, för att tillverka samtliga kapselkomponenter. Tekniska specifikationer och rutiner ingår i det kvalitets-system, som har utvecklats för att tillverka kapslar. Detta är avsett att täcka hela tillverknings-kedjan från materialleverantörer till färdiga kapslar. Kvalitetssystemet är en del av SKB:s certifierade kvalitetssystem enligt ISO 9001 och ISO 14001. Både tekniska specifikationer och rutiner uppdateras kontinuerligt som en följd av det pågående utvecklingsarbetet.

5.3.1 Kapselinsatser

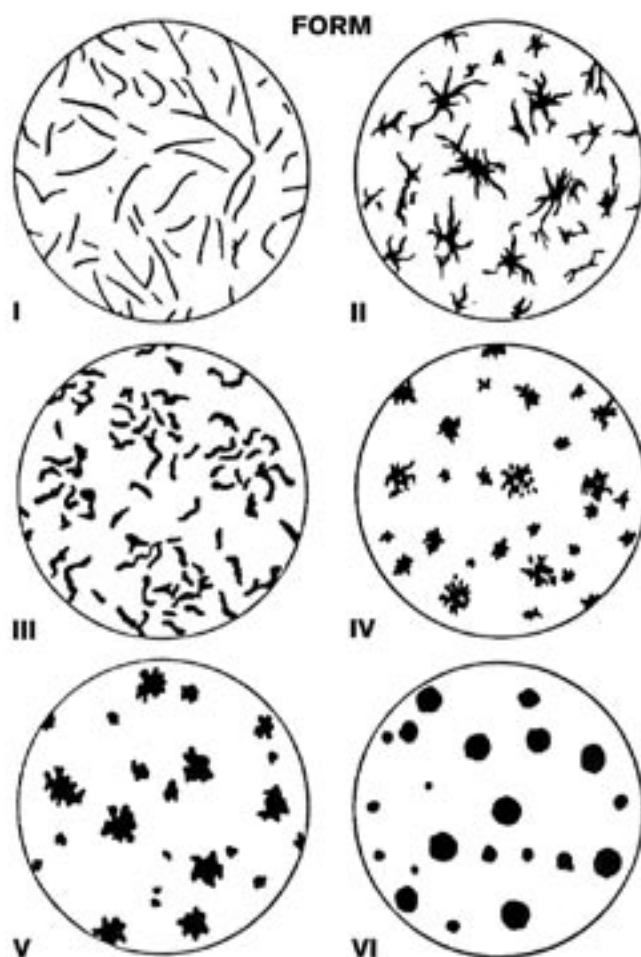
Kapselinsatsen är den tryckbärande komponenten i kapseln och ska uppfylla de krav på hållfasthet som följer av detta. Insatserna tillverkas i gjutjärn. Det valda materialet är ett så kallat segjärn med en i huvudsak ferritisk grundstruktur. Gjutjärn är generellt den gemensamma benämningen på järn-kol legeringar med mer än cirka två viktprocent kol. De tekniskt använda gjutjärnen har vanligen kolhalter i intervallet 2,5–4 procent. För en grupp av gjutjärn gäller att kol, som inte binds på annat sätt, skiljs ut som fri grafit då det smälta järnet svalnar och stelnar. Grafiten kan uppträda i olika former. Det är den fria grafits form som ger olika typer av grafitiska gjutjärn med sinsemellan olika egenskaper. Dessa typer har standardiserats, se figur 5-3.

Järn med grafitform I kallas för gråjärn. Gråjärn är den mest tillverkade gjutmetallen och används i många olika sammanhang. Segjärn med grafitform VI produceras också i stora volymer. Komponenter av samma eller större storlek än SKB:s insats tillverkas i många gjuterier i både gråjärn och segjärn.

Grafitens form har stort inflytande på materialets egenskaper. I gråjärn verkar den fjällformade grafiten som brottanvisningar inuti materialet. Gråjärn är därför ett relativt sprött material. Segjärn har betydligt högre hållfasthet och seghet än gråjärn, eftersom grafiten uppträder i kulform (nodulär grafit). Hållfasthetsegenskaperna samt att det faktum att segjärn har goda gjutegenskaper och är relativt lätt att maskinbearbeta, är några av orsakerna till att segjärn valts som material i insatserna.

Grafitens form, storlek och fördelning kan styras genom att man tillsätter små mängder av vissa ämnen till smältan. Vanligt i segjärn är magnesiumtillsatser samt så kallat ympmedel, i regel ferrokisel. Gjutjärnens egenskaper kan även påverkas av olika halter av legeringsämnen, exempelvis mangan, nickel, krom och koppar.

De mekaniska egenskaperna testas genom dragprovning med provstavar, som när det gäller gjutgods kan tas ut på principiellt olika sätt. Vi ska i detta sammanhang skilja mellan vidgjutna provstavar och provstavar som tillverkats från en del av den gjutna detaljen. Av de två varianterna motsvarar de sistnämnda bäst egenskaperna i den färdiga komponenten. Vidgjutna provstavar åstadkommes vid formsättningen i regel genom håligheter i formväggen. Provkroppar med lämplig storlek gjuts då som utskjutande delar av produkten. Ur dessa kan sedan provstavar för till exempel dragprovning tillverkas. De vidgjutna provkropparna stelnar och svalnar tillsammans med den gjutna komponenten och ska därför få en struktur och därmed



Figur 5-3. Grafitformer i gjutjärn enligt EN-ISO 945. I segjärn är den dominerande grafitformen nr VI (nodulär grafit).

egenskaper som motsvarar godset i den färdiga produkten. Bäst överensstämmelse fås vid gjutning av mindre detaljer. Fördelen med vidgjutna provkroppar är att de kan sågas bort från komponenten utan att denna skadas.

Under utvecklingsarbetet har SKB studerat materialegenskaperna i såväl vidgjutna provstavar som i kapade skivor från själva insatsen. Insatserna har gjutits med en extra längd, så att en kapad skiva har kunnat utvärderas från den övre delen av insatsen. Den extra längden har gjort att insatser med ritningsenliga längder ändå har kunnat tillverkas. Några insatser har dock kapats upp så att ytterligare skivor, utefter insatsernas längd, har kunnat användas för en omfattande materialprovning.

Ett antal segjärn finns internationellt standardiserade i SS-EN 1563. Standarden ställer inga krav på den kemiska sammansättningen. Däremot anges att grafitformen i huvudsak ska motsvara form V och VI. Specificerade krav finns på de mekaniska egenskaperna för gjutgods med olika dimensioner. SKB:s kapselinsatser representerar dock ett betydligt grövre gjutgods än vad som har preciserats i denna standard. Standarden lämnar dock möjligheten öppen för att komma överens om specifika materialkrav med aktuella leverantörer från fall till fall. Preciserade materialkrav, som säkerställer att insatserna uppfyller konstruktionskraven, kan fastställas när relevanta hållfasthetsberäkningar och verifierande tryckprov har genomförts enligt nedanstående program.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB konstaterade i Fud 2001 att segjärnets mekaniska egenskaper är starkt beroende av den gjutna kroppens dimensioner. Materialprovning måste därför utföras på de färdiga insatserna.

Erhållna resultat ska ligga till grund för att optimera tillverkningsprocessen, materialspecifikationen och provningsmetoderna. Analyser av hållfastheten ska, förutom att visa att kapseln uppfyller konstruktionskraven, också baseras på de verkliga materialegenskaperna hos tillverkade kapslar.

SKI konstaterade i sin granskning av Fud 2001 att SKB i större utsträckning bör verifiera insatsernas mekaniska egenskaper genom att undersöka några tillverkade insatser mer ingående. SKI framförde även synpunkten att simuleringsprogram bör köras för att man ska uppnå ett tillfredsställande resultat vid gjutningen av insatsen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

En omfattande materialprovning har utförts på ett antal gjutna insatser, både med vidgjutna provstavar och med provstycken från själva insatserna. För att kartlägga variationer i egenskaperna mellan olika provlägen har provstavar för dragprovning och strukturkontroll tillverkats ur kapade skivor från olika lägen i insatserna, se figur 5-4. Ett exempel på provlägen framgår av figur 5-5.

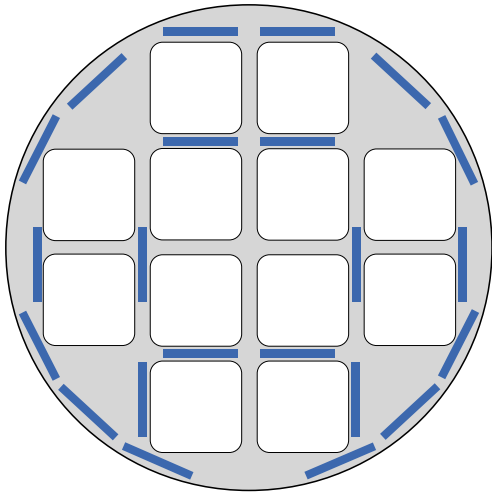
SKB har kunnat konstatera en relativt stor spridning i materialegenskaperna i flera enskilda insatser. Störst spridning vid dragprovning har värden på brottförlängning. Segheten hos denna typ av gjutjärn är starkt beroende av grafitens struktur och om det finns materialdefekter som porositeter i godset. I några insatser har grafitens nodularitet (rundhet som i typ VI i figur 5-3) varierat i insatsen. En viss förekomst av porositeter och slagpartiklar har även kunnat konstateras. Detta har påvisats med såväl mikroskopi som ultraljud.

En analys hos Svenska Gjuteriföreningen, med bland annat datorsimuleringar av gjuttekniken hos varje enskilt gjuteri, har gett indikationer på vissa förbättringar. Detta och gjuteriernas egna bedömningar beträffande processparametrar har medfört att åtgärder vidtagits för att få jämnare materialegenskaper.

Ett omfattande utvecklingsprojekt med probabilistisk analys av kapslarnas hållfasthet har påbörjats. Deltagande är förutom SKB, Svenska Gjuteriföreningen, Ångpanneföreningen, Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm, Joint Research Center (JRC) i Holland, Det Norske Veritas samt CSM Materialteknik AB. Tre insatser från olika gjuterier ingår i undersökningen.



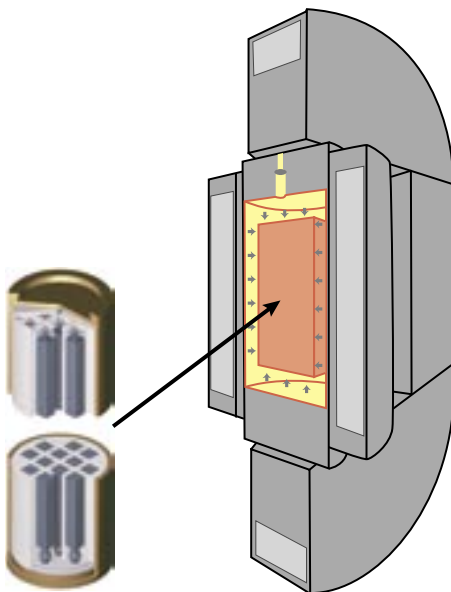
Figur 5-4. Kapade skivor ur gjuten insats för materialprovning.



Figur 5-5. Lägen för uttagna provstavar i skiva ur en gjuten insats.

Ett relativt stort antal provstavar tas från olika lägen i varje insats enligt principen i figurerna 5-4 och 5-5. Alla provstavar och även hela skivor röntgas för att få värden på storlek och fördelning av defekter i godset. Hållfasthetsegenskaperna utvärderas genom konventionell dragprovning, men även genom kompressionsprovning och brottseghetsprovning. Därefter genomförs en fraktografisk analys av brottytor och mikrostrukturen undersöks metallografiskt. Den stora mängden information ska användas i en probabilistisk analys av sannolikhet för haveri och ett värde på den kritiska defektstorleken vid de påkänningar som kapslarna kommer att utsättas för.

Inom ramen för projektet genomförs även hållfasthetsberäkningar med finita elementmetoder. Dessutom görs verifierande tryckprov i kallisostatpress, se figur 5-6. Provkroppen, se figur 5-7, består av en del av aktuell insats, cirka 70 centimeter lång men med full diameter. Båda ändarna av insatsen täcks av ett fastskruvat stållock och omges av ett 5 centimeter tjockt kopparrör med lock och botten också i koppar. Provkroppen motsvarar alltså, frånsett längden, en riktig kopparkapsel.



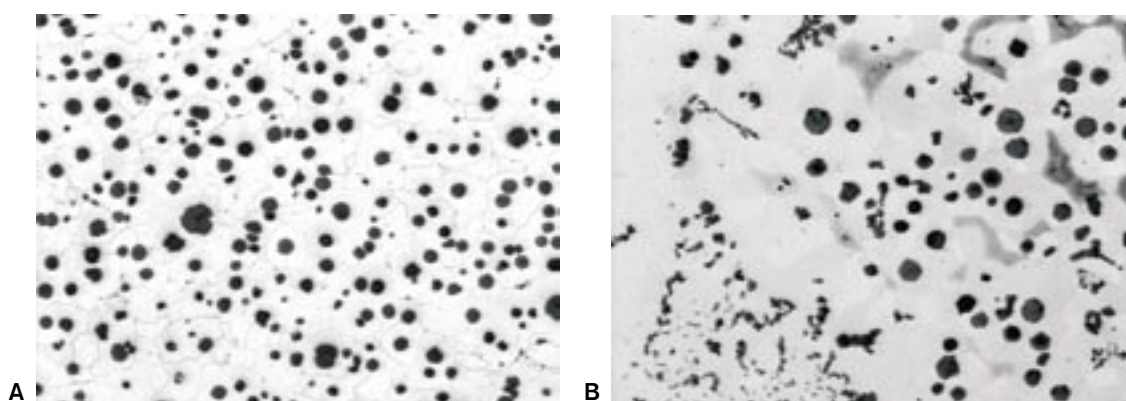
Figur 5-6. Schematisk bild av en Quintus kallisostatpress som används för verifierande tryckprov av kapselhållfasthet.



Figur 5-7. Del av gjuten insats och kopparrör för tryckprovning.

En genomförd hållfasthetsberäkning visade att den relativt korta längden på denna provkapsel inte väsentligt förändrar kollapslasten jämfört med en kapsel med full längd.

En viss förekomst av icke nodulär grafit samt gjutdefekter som små porositeter, slaggpartiklar och enstaka större gjutfel kommer inte helt att kunna undvikas i ett så stort gjutstycke som insatserna representerar. I enstaka dragprovstavar, som tas ur olika lägen i insatser, kommer även mikroskopiska defekter att medföra förhållandevis låga värden på framför allt segheten. Detta kommer att ge en spridning hos erhållna data. Resultat från hållfasthetsberäkningar och tryckprov i en isostatpress indikerar dock att insatserna trots detta har en hållfasthet som med god marginal motsvarar konstruktionskraven. Det fortsatta arbetet kommer att vara inriktat på att fastställa nödvändiga materialkrav som ska säkerställa insatsernas hållfasthet. Figur 5-8 visar grafitstrukturen i olika prover ur insatser.



Figur 5-8. Grafitstruktur i olika prover ur insatser. Figur A visar en segjärnsstruktur med väl utvecklade grafitnoder. I figur B visas en delvis defekt grafitstruktur med så kallad "chunkygrafit".

Program

Utvecklingsprojektet med probabilistisk hållfasthetsanalys kommer att slutföras under 2004. Resultaten kommer att ligga till grund för att fastställa preciserade materialkrav, som säkerställer att insatserna uppfyller konstruktionskraven.

Ytterligare insatser för BWR-element kommer att gjutas och utvärderas mot ställda krav. Vissa insatser kommer härvid att styckas för speciellt grundliga materialundersökningar.

Endast en insats för PWR-element har hittills tillverkats. Ytterligare några insatser för PWR-element kommer därför att tillverkas och utvärderas på motsvarande sätt som insatser i BWR-utförande.

SKB kommer att stödja och delta i ett doktorandarbete med titeln "Förbättrad grafitstruktur i tjockväggigt segjärnsgjutgods", vid Ingenjörshögskolan i Jönköping och Svenska Gjuteriföreningen.

Möjligheterna att använda ultraljud för kontroll av grafitens nodularitet i insatser kommer att studeras, se även avsnitt 5.5.

5.3.2 Kapselrör, lock och bottnar

För att uppfylla kravet på kemisk beständighet, i den miljö som råder i djupförvaret, har koppar valts som barriär mot korrosion. Koppar bedöms dels ha den livslängd som erfordras och dels ha minimal påverkan på övriga barriärer i djupförvaret. Det grundläggande kravet på korrosionsbeständighet har lett till att ren syrefri koppar ska användas. SKB:s övriga speciella krav på materialet har medfört att någon direkt motsvarighet i svensk eller internationell standard inte finns. SKB har därför sammanställt en egen teknisk specifikation. Enligt denna ska materialet uppfylla kraven enligt standarden EN 1976:1988 för Cu-OFE eller Cu-OF1 men med tilläggskraven: syre mindre än 5 ppm, fosfor 30–70 ppm, väte mindre än 0,6 ppm, svavel mindre än 8 ppm samt att medelkornstorleken i smidda ämnen för lock och bottnar och i rör ska vara mindre än 360 µm. Bakgrunden till de delvis skärpta kraven jämfört med internationell standard kan sammanfattas enligt följande:

- Av tillverkningstekniska skäl måste det finnas ett visst spel på någon millimeter mellan insatsen och kopparhöljet. Detta innebär att kopparhöljet kommer att deformeras plastiskt upp till fyra procent i djupförvaret. I huvudsak sker deformationen genom krypning. Materialet måste ha en duktilitet som klarar detta med god marginal. Ämnen som väte och svavel har en negativ inverkan och måste reduceras till låga halter. Fosfor har visat sig ha en gynnsam effekt på krypduktiliteten och specificeras därför i KTS 001 /5-10/ till halter mellan 30 och 70 ppm.
- Om materialet ska kunna svetsas med elektronstrålesvetsning måste syrehalten ligga på en låg nivå.
- Ett material med stor eller ojämn kornstorlek är ogynnsamt för materialets egenskaper och medför också svårigheter vid ultraljudprovning. Tillåten kornstorlek i kopparhöljet har därför satts till högst 360 µm (medelkornstorlek enligt EN ISO 2624:1995).

De metoder som provats vid rörtillverkning är rullformning, extrudering, dornpressning och smide. Även om SKB tidigare har konstaterat att rullformning och längssvetsning kan utvecklas till en fungerande metod, har sedan 1998 all rörtillverkning skett med de tre övriga metoderna, som alla innebär tillverkning av rör utan längsgående svets sömmar. Ämnen för lock och bottnar tillverkas genom smide. I samtliga dessa fall är varmformningstemperaturen cirka 700 °C.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB konstaterade i Fud 2001 att provtillverkning med aktuella metoder ska fortsätta.

Viktiga delmoment i det fortsatta arbetet är att optimera kornstorleken samt att förbättra materialutbytet och utveckla kontrollmetoder. Parallellt med utveckling och provtillverkning hos olika leverantörer kommer forskningsprojekt att bedrivas vid branschforskningsinstitut, tekniska högskolor och universitet. Syftet är att, genom datorsimulering och prov i laboratorieskala samt genom materialprovning, få ökad kunskap som bidrar till optimering av tekniska specifikationer och tillverkningsteknik.

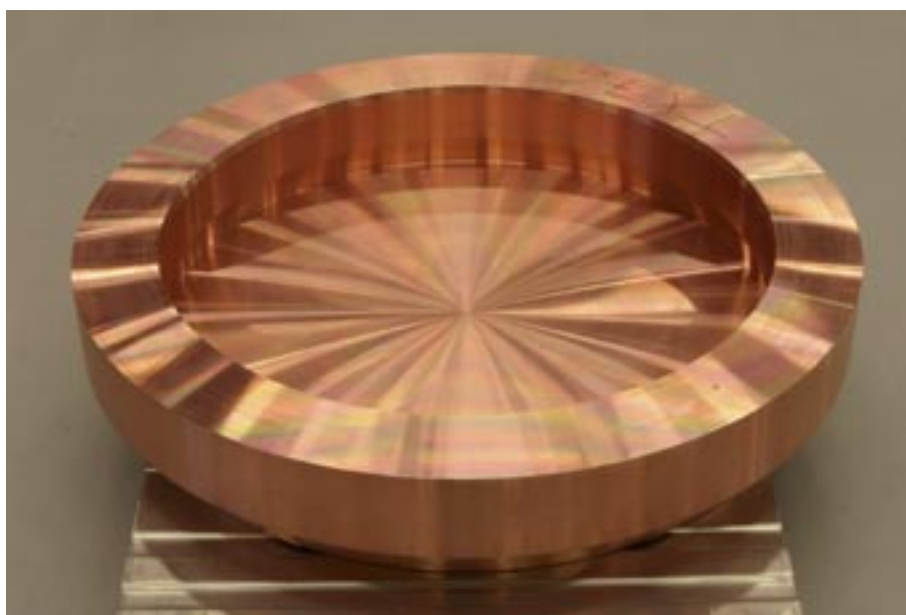
SKI anser att SKB, genom simulering, beräkningar etc, måste visa att tillräcklig bearbetningsgrad uppnås genom hela röret och rakt igenom koppartjockleken, oavsett tillverknings sätt.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Datorsimuleringar har utförts i ett doktorandarbete vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm /5-11/. Dessa simuleringar har i första hand omfattat extrudering av kopparrör samt smide av ämnen för lock och bottenar. Resultaten har medfört en ökad kunskap om hur materialet deformeras vid olika formningsmetoder och villkoren för att få en struktur med acceptabel kornstorlek. För smide av lock och bottenar har resultaten använts för att optimera smidesverktygen. Ett antal smiden med den förbättrade tekniken har visat att ämnen för lock och bottenar nu kan produceras med mycket tillfredsställande resultat.

Simulering av dornpressning, i syfte att tillverka kopparrör med integrerad botten, har utförts av Posiva Oy och Vallourec & Mannesmann. Resultaten har använts för att utforma varmformningsverktygen. Utförda tillverkningsprov med dornpressning har hittills indikerat att en tillräckligt finkornig struktur kan erhållas i den integrerade botten. Fortsatt optimering av smidesverktyg och processparametrar kommer ytterligare att kunna förbättra resultatet.

Provtillverkning av kopparrör med smide vid Scana Steel Björneborg AB har visat att metoden ger en acceptabel kornstorlek. Denna metod behöver utvecklas vidare genom optimering av verktygsutformning och processparametrar.



Figur 5-9. Smitt och maskinbearbetat lock i koppar.

Program

Provtillverkning av samtliga kopparkomponenter kommer att fortsätta för att bekräfta tillförlitligheten hos de olika metoderna samt för att ytterligare optimera verktygen och processparametrarna vid tillverkningen samt tekniska specifikationer beträffande materialkrav.

Sömlösa kopparrör kommer att tillverkas med de tre metoderna extrudering, dornpressning och smide. Vissa rör kommer att styckas för mer omfattande materialundersökningar.

Möjligheten att tillverka kopparrör med integrerad botten med dornpressning kommer att prövas vidare.

Möjligheten att använda ultraljud för kontroll av kornstorleken i kopparkomponenter kommer att studeras, se även avsnitt 7.2.

5.4 Provtillverkning

För att vidareutveckla tillverkningstekniken för kopparkapslar med gjutna insatser har under de senaste åren fortsatta tillverkningsprov utförts i full skala enligt riktlinjerna i Fud 2001. Erhållna resultat redovisas i en särskild rapport /5-9/.

5.4.1 Kapselinsatser

Sammanlagt har hittills 20 insatser gjutits i segjärn och utvärderats. Ytterligare sex insatser kommer att tillverkas och utvärderas under 2004.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB framförde i Fud 2001 att gjutning av insatser i segjärn med integrerad botten har potential att utvecklas till en fungerande metod.

En synpunkt från myndigheterna var att för att uppnå ett tillfredsställande resultat vid gjutningen av insatsen bör simuleringsprogram köras, se även avsnitt 5.3.1.

Vidare framfördes vikten av att SKB i större utsträckning borde verifiera insatsernas mekaniska egenskaper genom att undersöka några tillverkade insatser mer ingående.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Åtgärder som datorsimulering av gjutningsprocesserna samt gjuteritekniska åtgärder vid varje gjuteri, i syfte att förbättra materialegenskaperna och minska spridningen, har diskuterats i avsnitt 5.3.1. Gjuteritekniskt har olika förbättringar gjorts. Datorsimuleringar och analyser vid varje enskilt gjuteri har lett till ökad förståelse och förbättringar beträffande gjutparametrar som gjuttemperatur och teknik vid tillsats av de små mängder av vissa ämnen som styr grafitens form och fördelning i den färdiga insatsen.

Program

Arbetet med probabilistisk analys av insatsernas hållfasthet kommer att slutföras under 2004. Resultaten kommer att ligga till grund för fastställande av acceptanskriterier och optimering av tekniska specifikationer.

Ytterligare insatser för BWR-element kommer att gjutas och utvärderas. Ett mindre antal insatser för PWR-element kommer också att tillverkas och analyseras. I samband med fortsatt provtillverkning kommer tekniska specifikationer och tillverkningsritningar för profilrör och för den svetsade kassetten att utvecklas vidare.



Figur 5-10. Färdigbearbetad insats och stållock till insats.

Tekniken och rutinerna för gjutning, grovbearbetning, kontroll och leverans av insatser kommer att vidareutvecklas i samarbete med gjuteriföretagen.

Metodik och utrustning för oförstörande provning med ultraljud som kontrollmetod kommer att utvecklas. Förutom detektering av diskontinuiteter i godset som porositeter och slagg, kommer möjligheterna att med ultraljud kontrollera nodulariteten hos grafiten i segjärnet att studeras, se även avsnitt 5.5.

5.4.2 Kapselrör, lock och bottenar

SKB påbörjade utvecklingen av tillverkningstekniken för kapslarna 1994–1995. Hittills har fyra olika metoder använts för att tillverka kopparrör: rullformning, extrudering, dornpressning och smide. Den metod som har visat sig ge de mest tillförlitliga resultaten vid produktion av kopparrör är extrudering. Lock och bottenar maskinbearbetas till fastställda mått ur ämnen som förformats genom varmsmide. Tekniken för att tillverka lock och bottenar sker under serie-mässiga former.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Arbetet inriktas på att visa att kopparrör i full skala kan tillverkas med dessa metoder och uppfylla gällande krav. Viktiga delmoment är att optimera materialutbyte, processparametrar och kontrollmetoder.

Viktiga delmoment i det fortsatta arbetet med att tillverka lock och bottenar är att optimera kornstorleken i de smidda ämnena samt att optimera materialutbyte och kontrollmetoder. För att optimera materialutbyte och kornstorlek kommer olika utformningar av smidesverktyg samt olika processparametrar att provas. Datorsimulering och prov i laboratorieskala av de aktuella tillverkningsmetoderna samt materialprovning, ska ge kunskap som kan bidra till den optimering av materialspecifikation och tillverkningsteknik som eftersträvas.



Figur 5-11. Extruderat och maskinbearbetat kopparrör.

Enligt SKI bör SKB i det fortsatta arbetet tydligare jämföra för- och nackdelar hos olika tillverkningsmetoder för att framställa sömlösa rör, till exempel uppvärmning i flera steg vid dornpressning och inverkan på rör (och botten) vid dornpressning med integrerad botten.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Dornpressning av rör ger en möjlighet att tillverka kopparrör med integrerad botten. Tre rör har tillverkats med denna målsättning. Med hjälp av datorsimulering har deformationsgraden vid de olika stegen i varmformningen kunnat studeras. Resultaten har använts för att utforma de verktyg som används så att varmbearbetningen av botten blir tillräcklig. Det senast tillverkade röret har fått en homogen botten med en acceptabel kornstorlek. Sannolikt kommer tekniken ytterligare att kunna förbättras. I samband med denna utveckling har ett par ingående studier av de stora koppargöt som behövs genomförts. Studierna har lett till en ökad kännedom om stelningsstruktur och förekomst av defekter, exempelvis centrumsprickor i göten. Detta i sin tur har lett till åtgärder hos kopparleverantören för att minimera felen. En godkänd tillverkning av rör med integrerad botten kommer att förutsätta leveranser av tillräckligt homogena koppargöt, optimerad verktygsutformning och utprovade processparametrar.

Även om dornpressning med integrerad botten inte kommer att vara en framkomlig väg kommer dornpressning ändå att kunna användas som en metod för tillverkning av kopparrör, öppna i båda ändar, tillsammans med extrudering och troligen även smide.

Tre kopparrör har tillverkats genom smide vid Scana Steel Björneborg AB. Resultaten hittills indikerar att smide av kopparrör sannolikt kan utvecklas till en fungerande metod. Resultaten har successivt förbättrats genom i första hand förbättringar i verktygsutformning.



Figur 5-12. Tillverkning av kopparrör med integrerad botten genom dornpressning.

För att mäta kopparrörens dimensioner har en metod och utrustning baserad på laserteknik utvecklats i samarbete med Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Utrustningen är mobil och kan transporteras till olika leverantörer av kopparrör för att kontrollmäta rörens rakhet, inre diameter och ovalitet utefter rörens hela längd. Metoden ger en mätning med avsevärt större noggrannhet än vad som tidigare var möjligt.

De resultat som erhållits efter datorsimuleringar och verktygsoptimering vid smide av ämnen för lock och botten har visat att detta nu är en fungerande metod.

Program

Fortsatt tillverkning av sömlösa kopparrör och ämnen för lock och botten kommer att ske för att verifiera och ytterligare optimera verktyg, processparametrar, kontrollmetoder och tekniska specifikationer. Sömlösa kopparrör kommer att tillverkas med extrudering för att verifiera denna metod. Fortsatta tillverkningsprov kommer att göras med dornpressning och smide. Utvecklingsarbetet med tillverkning av kopparrör med integrerad botten genom dornpressning kommer att fortsätta.

Tillverkning kommer att utföras för i första hand fem centimeters väggjocklek men även i begränsad omfattning för fyra centimeter i syfte att vinna erfarenhet och få underlag för ett eventuellt senare beslut om en ändring.

I det fortsatta arbetet med rörtillverkning kommer successivt för- och nackdelar med de olika metoderna att jämföras. Sannolikt kommer fler än en av dessa metoder att kunna användas för kommande serietillverkning.

Utvecklingen av laserteknik för dimensionsmätning av kopparrör kommer att fortsätta.

Metodik och utrustning för oförstörande provning med ultraljud som kontrollmetod kommer att utvecklas. Förutom detektering av diskontinuiteter i godset, kommer möjligheterna att med ultraljud kontrollera kornstorleken i de tillverkade kopparkomponenterna att provas, se även avsnitt 5.5.

5.5 Oförstörande provning av kapselkomponenter

Kapselns olika delar kommer att undersökas med olika metoder för oförstörande provning (OFP) för att visa att de uppfyller tillverkningskraven.

Slutsatser i FUD 2001 och dess granskning

Erfarenheter från provtillverkning av alla kapseldelar kommer att tas tillvara och påverka den fortsatta utvecklingen av tillverkningstekniken. Arbetet med att utreda och fastlägga acceptanskriterier och provningsmetoder kommer att innebära att utrustning för oförstörande provning och övrig kvalitetskontroll kan specificeras mer exakt. En fördjupad utredning av anpassad maskinell utrustning och provningsutrustning för kapselfabriken kommer att utföras i samarbete med potentiella leverantörer.

Myndigheternas synpunkter redovisas i avsnitt 7.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Se även avsnitt 7.2.

De metoder som tillverkarna använder sig av för att prova kapselkomponenterna har kartlagts. Dessutom har de metoder som leverantörerna använder sig av för att prova liknande föremål i sin produktion studerats.

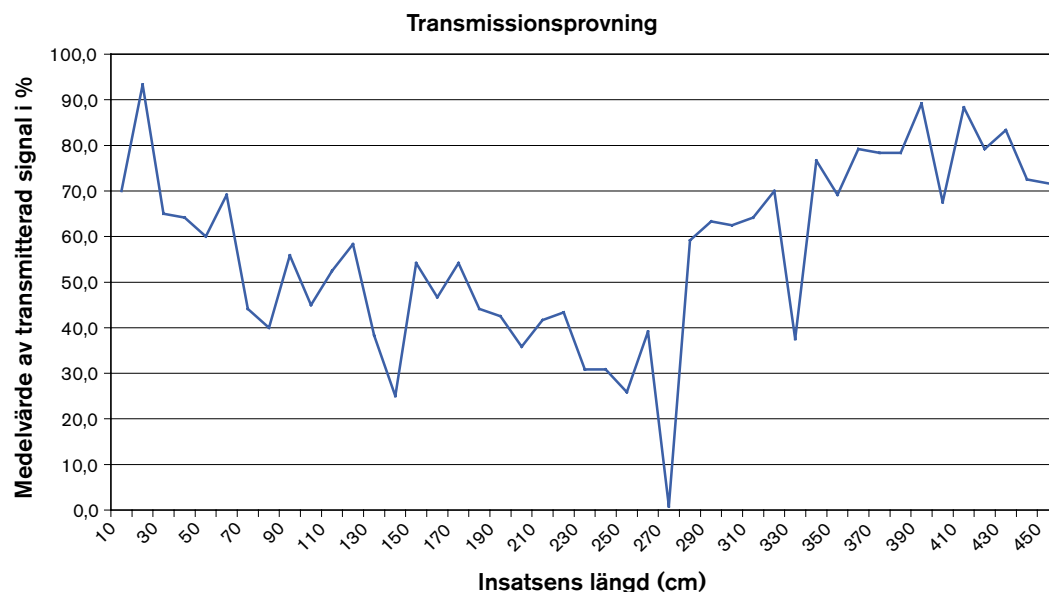
En av SKI:s synpunkter på Fud 2001 var att det saknades en sammanhållen dokumentation av erhållna resultat och erfarenheter från oförstörande provning. En rapport som redovisar resultat fram till och med år 2002 har sammanställts /5-10/.

Arbetet har varit inriktat mot att inhämta kunskap och utvärdera möjligheterna för dessa metoder. Ett viktigt mål är att bestämma OFP-metodernas tillförlitlighet. Arbetet har koncentrerats till de mest kritiska och största objekten.

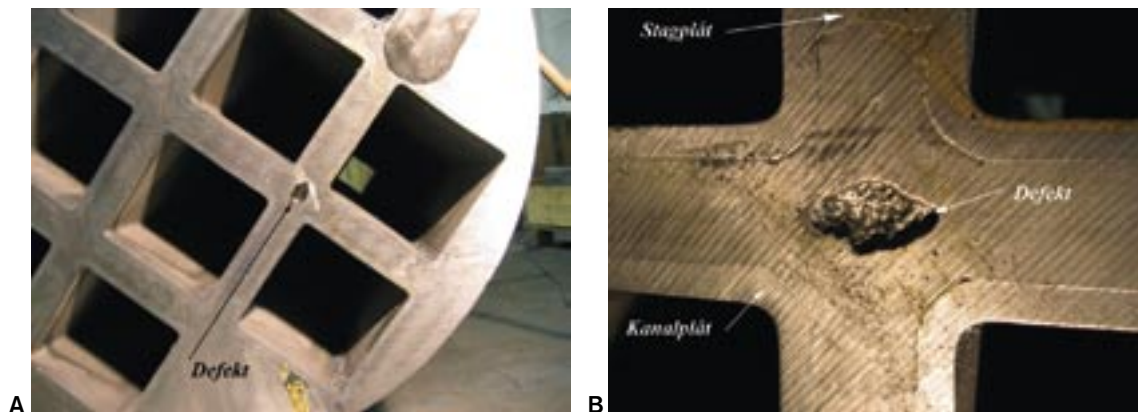
Segjärnsinsats

De yttre delarna av insatsen prövas med ultraljud av leverantörerna. Provningsen utförs i två steg med olika sökare, anpassade för detta ändamål. För att pröva gjutgodset mellan kanalrören har transmissionsprovning med ultraljud använts. De första försöken visar att det finns goda förutsättningar att utveckla metoden. I figur 5-13 visas resultaten av en provning utförd med denna metod. Till grund för figur 5-13, ligger den signal som erhållits från transmissionsprovning genom alla kanallägen vid en viss position av längden. Signalen har sedan sammanställts för de sex provningarna och ett medelvärde har beräknats. Detta ger en bild över hela snittet genom denna position på insatsen. Figuren visar tydligt att ett område runt 270 centimeter från botten av insatsen hade indikationer på defekter mellan kanalerna. Vid en närmare undersökning visade det sig att en defekt verkligen fanns inom det området. Figur 5-14 visar det området då insatsen kapats upp vid cirka 270 centimeter från botten.

Resultaten av provningarna tyder på att det finns goda förutsättningar att detektera defekter i olika delar av insatsen. Det visade sig också vara möjligt att detektera de områden för stagplåtarna med dålig bindning mellan plåt och segjärn.



Figur 5-13. Medelvärde av transmitterad signal i procent för respektive position.



Figur 5-14. Kapat område 270 centimeter från botten av insats I25.

Lock och bottenar i koppar

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Kopparrör

En referensring med konstgjorda fel har tagits fram. Denna har använts för att säkerställa att det automatiska ultraljudssystem som använts klarar att detektera vissa typer av fel. De fel som finns i referensringen är spår på olika djup. Metoden kan detektera fel belägna radiellt i cylindern men inte storleksbestämma dessa. Vidare kan även axiella fel detekteras och till viss del storleksbestämmas. Erfarenheter från Kapsellaboratoriet visar att provning av kopparrör kan utvecklas och förbättras, både från detekterings- och utvärderingssynpunkt.

Stållock

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Övrigt

Försök har utförts för att undersöka möjligheten att med ultraljud bestämma kornstorleken hos kopparmaterialet. Metoden använder ljuddämpning som en mätparameter. Resultaten visar att metoden har möjligheter att ge önskvärda data.

Program

Erfarenhetsuppbyggnad och successiv metodutveckling kommer enligt planerna att ske under 2004–2005.

Preliminära OFP-procedurer kommer enligt planerna att fastläggas under år 2005. Som ett led i detta arbete kommer lämpliga referensproppar att tas fram.

Fortsatt erfarenhetsuppbyggnad och utvärdering av tillförlitlighet planeras under perioden 2006–2007. Arbetet kommer att ske i nära samarbete med Kapsellaboratoriet.

Fortsatta undersökningar planeras för att bestämma materialparametrar med ultraljud hos både koppar och segjärn. I koppar är kornstorleken av intresse och i segjärn grafitens nodularitet.

Inom projektet avseende probalistisk analys av insatsens hållfasthet, se avsnitt 5.3.1, undersöks förekomst av olika defekttyper i segjärn. Dessa kommer att karakteriseras utifrån ett OFP-perspektiv och katalogiseras.

Studier av möjliga defekttyper som kan uppstå vid de olika tillverkningsprocesserna i koppar och segjärn planeras.

5.6 Kapselabrik

SKB behöver ha mycket god kontroll över de tomma kapslar som levereras till inkapslingsanläggningen. Därför planeras en egen kapselabrik. I den senast gjorda planeringen /5-8/ beskrivs en referensutförning där ämnen till alla kapselkomponenter levereras till fabriken från olika underleverantörer. I fabriken ska komponenterna färdigbearbetas, kontrolleras och sättas samman till färdiga tomma kapslar som transporteras till inkapslingsanläggningen.

Den grundläggande principen för fabriken är att hanteringen av koppar och segjärn är separerad hela vägen fram till att insatsen lyfts ner i kopparröret. Fabriken ska alltså inrymma två bearbetningslinjer; en för bearbetning av koppar och en för bearbetning av segjärnsinsatser och stållock till insatser. Sömlösa, sannolikt grovbearbetade, ämnesrör i koppar leveras till fabriken från underleverantörer. Rören kommer att vara tillverkade med en eller flera av metoderna extrudering, dornpressning eller smide. Smidda och sannolikt grovbearbetade ämnen i koppar för lock och botten levereras också till fabriken från underleverantörer. I fabriken maskinbearbetas rören samt lock och botten till fastställda mått. Efter kontrollmätningar svetsas botten på kapselrören och kontrolleras med oförstörande provning som ultraljud och röntgen. Momentet med svetsning av botten kan komma att bli överflödigt om utvecklingen av tillverkningsmetoden dornpressning av rör med integrerad botten blir framgångsrik.

I den andra bearbetningslinjen svarvas insatser och insatslock. Insatserna levereras gjutna och grovbearbetade från olika gjuteriföretag. Insatslocken tillverkas ur valsad stålplåt. Efter kontrollmätningar och rengöring av samtliga delar lyfts insatsen ner i kopparröret. Den färdiga kapseln placeras sedan i en särskild transportvagn och levereras tillsammans med ett insatslock och ett kopparlock till inkapslingsanläggningen.

För den framtida produktionen i kapselabriken är leveranssäkerheten från olika underleverantörer av fundamental betydelse. Alla komponenter som ska levereras till kapselabriken måste uppfylla SKB:s kvalitetskrav. Dessa specificeras i det kvalitetssystem för kapseltillverkning som redan finns, som är certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001 och som successivt utvecklas. Ett led i det pågående arbetet med utveckling av kvalitetssystemet är att finna det nödvändiga nätverket av lämpliga underleverantörer samt att skapa en långsiktig och affärsmässig relation med dessa. I samband med pågående provtillverkning sker en kontinuerlig bedömning av aktuella leverantörer genom regelbundna kvalitetsrevisioner samt analys av prissättning, leveranssäkerhet och sannolik framtida utveckling.

Var kapselabriken kommer att lokaliseras är ännu inte beslutat. Frågor som måste beaktas vid lokaliseringen rör bland annat transporter till och från fabriken samt samhällsaspekter, som tillgång till arbetskraft och industrimiljö. Alternativ som kommer att studeras är en lokalisering i samma region som inkapslingsanläggningen eller djupförvaret, men även helt andra alternativ kan bli aktuella.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Utförningen av kapselabriken måste uppdateras vid ändringar i tillverkningsteknik eller kapselutförning. SKB rekommenderas av SKI att fortsätta studera om eventuellt ändrad teknik för bearbetning av kopparrör och blästring av insatser samt fördelning av vad som görs hos leverantörer och vad som utförs i kapselabriken, kan öka kvaliteten hos de levererade kapslarna. SKI har gjort en egen analys och bedömning av SKB:s utredning och planering av kapselabriken /5-12/. Resultatet av denna är att SKB:s föreslagna tillverkningsmetoder, utrustningsval och organisation bör innebära att en fungerande tillverkning av kapslar kan skapas. Dock rekommenderas i några fall vidare utredningar.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Erfarenheterna inom ramen för slutsatserna i Fud 2001 dokumenteras. Ingen ny separat analys av kapselabriken har utförts.

Program

Erfarenheter från provtillverkningen av alla kapseldelar kommer att tas tillvara och påverka den fortsatta utvecklingen av fabriken. Arbetet med att utreda och fastlägga acceptanskriterier och provningsmetoder kommer att innebära att anpassad utrustning för OFP och övrig kvalitetskontroll kan specificeras mer exakt. En fördjupad utredning av anpassad maskinell utrustning och provningsutrustning kommer att göras i samarbete med potentiella leverantörer. Detta kommer att ge möjlighet till en mer exakt analys av fabriken layout och investeringskostnader.

Om utvecklingen av friction stir welding visar att tekniken kan bli aktuell för att försluta kapslarna kommer konsekvenserna av detta att behöva utredas och vägas in i fabrikslayout och investeringskostnader.

För att få en fullständig bild av potentiella osäkerheter kommer en riskanalys av verksamheten i den planerade kapselfabriken att genomföras.

En detaljtidsplan anpassad till SKB:s huvudtidsplan ska tas fram.

En teknisk beskrivning av kapselfabriken kommer att bifogas ansökan för inkapslingsanläggningen. Lokaliseringsarbetet för kapselfabriken förväntas dock inte vara avslutat vid tiden för ansökan om djupförvaret.

6 Kapsel – förslutning

Två olika metoder är aktuella för att försluta kapseln: friction stir welding (FSW) och elektronstrålesvetsning (EBW). SKB utreder metoderna parallellt. De resultat som hittills uppnåtts visar att båda metoderna ger svetsar av tillräckligt god kvalitet. Vår avsikt är att välja referensmetod för förslutning i mars 2005. Därmed kommer vi att ha tillräckligt lång tid på oss för att kunna slutföra projekteringen av inkapslingsanläggningen inför ansökan. Avsnitt 6.1 behandlar den övergripande planeringen inför ansökan. Programmen för elektronstrålesvetsning respektive friction stir welding beskrivs i avsnitt 6.2 respektive 6.3. En närmare beskrivning av strategi och metodik för att välja svetsmetod redovisas i kapitel 7.

När kapslarna har förslutits ska de kontrolleras med olika metoder för oförstörande provning (OFP), till exempel röntgen och ultraljud. Tillämpningen av metoderna för oförstörande provning skiljer sig åt beroende på vilken svetsmetod som använts. Det går således inte att spåra diskontinuiteter med hjälp av ultraljud i en FSW-svets med exakt samma förfarande som för en EBW-svets. SKB:s arbete med oförstörande provning av kapslarnas förslutningssvetsar är inriktat mot att:

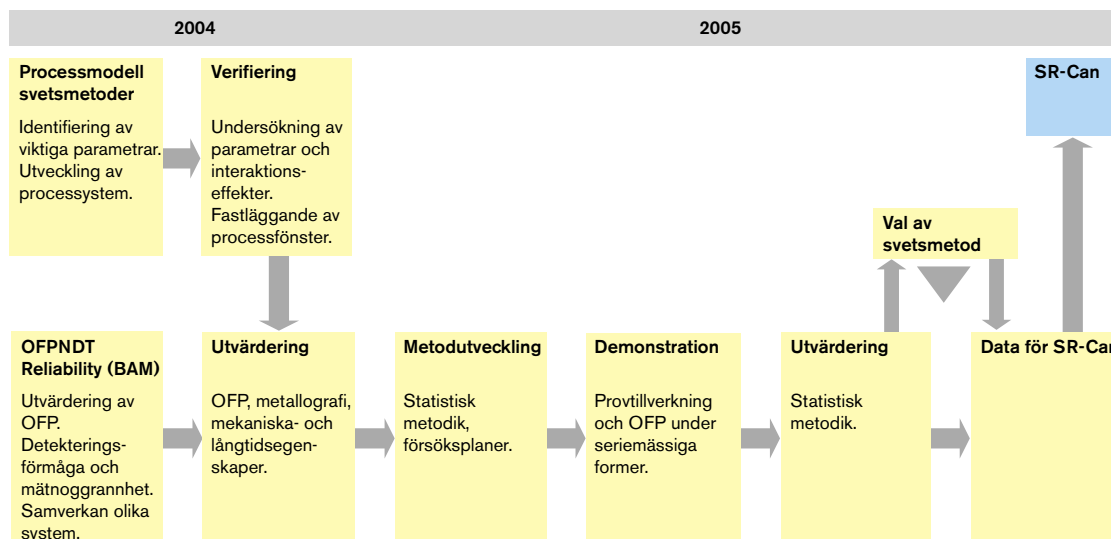
- Utveckla befintliga metoder.
- Utprova nya metoder.
- Verifiera metodernas tillförlitlighet.

Programmet för oförstörande provning återfinns i avsnitt 6.4.

6.1 Planering

Vid tiden för ansökan om tillstånd för att få uppföra inkapslingsanläggningen ska SKB ha valt metoder för förslutning och provning. Anledningen till detta är att metoderna påverkar utformningen av inkapslingsanläggningen. Vid denna tidpunkt ska även ett program för kvalificering av metoderna finnas. De övergripande milstolparna för arbetet inom förslutningstekniken och den oförstörande provningen är:

- Att verifiera svetsprocesserna, det vill säga att bekräfta att de viktiga processparametrarna, som bestämmer svetskvaliteten, är identifierade samt att fastställa inom vilka gränser dessa kan tillåtas variera. Programmet genomförs under 2004. Ytterligare information finns under respektive svetsmetod i avsnitt 6.2 och 6.3.
- Att demonstrera svetsprocesserna, det vill säga att visa den svetskvalitet som uppnås under produktionsliknande former samt att visa att respektive svetsprocess kan bedrivas under industriella förhållanden. Programmet genomförs under 2004 och början av 2005.
- Att fastställa hur tillförlitlig den oförstörande provningen är, det vill säga att fastställa sannolikheten för att vi ska kunna detektera diskontinuiteter av olika typ och storlek. Programmet genomförs under 2004–2005. Eftersom svetsmetoderna bygger på skilda principer är de metoder som tillämpas vid oförstörande provning anpassade till respektive svetsmetod, se avsnitt 6.4.
- Att välja referensmetod för att svetsa kapseln. Tidpunkten för att välja referensmetod är kopplat till tidsplanen för att projektera inkapslingsanläggningen. För ytterligare information kring val av svetsmetoder se kapitel 7.
- Att ta fram data för säkerhetsanalysen SR-Can. Ett program med syfte att bestämma sannolikheten för att kapslar som innehåller kritiska defekter levereras från inkapslingsprocessen har startats, se vidare avsnitt 7.1. Övrig forskning om kapselns långsiktiga säkerhet behandlas i kapitel 16.



Figur 6-1. Logiska samband och tidsordning mellan milstolparna inom förslutningstekniken.

För de första två punkterna (verifiering respektive demonstration av svetsmetoderna) gäller att statistisk metodik kommer att tillämpas för försöksplanering och utvärdering, och att data från programmen kommer att användas i säkerhetsanalysen. För mer detaljerad information se avsnitt 6.2 och 6.3 samt /6-1/. De logiska sambanden och tidsordningen mellan milstolparna visas i figur 6-1.

6.2 Elektronstrålesvetsning

SKB har under de senaste två decennierna utvecklat tekniken för elektronstrålesvetsning vid The Welding Institute (TWI) i Cambridge, Storbritannien /6-2/. Utvecklingen vid Kapsellaboratoriet inleddes 1999. Tekniska detaljer avseende denna system- och processutveckling har rapporterats fram till och med 2001 /6-3/ respektive 2003 /6-4/.

En viktig del av utvecklingsarbetet är att fastställa hur ofta diskontinuiteter förekommer i svetsarna och under vilka förhållanden de bildas. Målet är att utforma svetsprocessen på ett sådant sätt att risken för att få defekter i svetsen blir mycket liten. Som nämns i SKB:s handlingsplan, se bilaga A, är arbetet inför ansökan om att få uppföra en inkapslingsanläggning helt inriktat mot en kopparkapsel med fem centimeters väggjocklek.

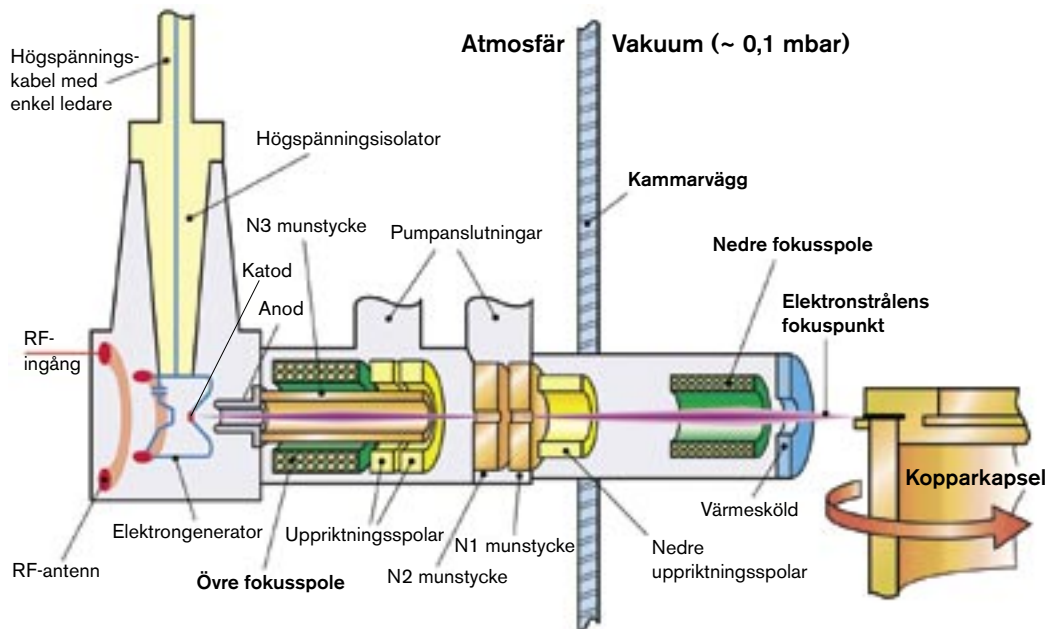
6.2.1 Svetsutrustning

Vid elektronstrålesvetsning används en elektronkanon. Elektronkanonen är utvecklad av TWI och konstruerad för att användas vid reducerat tryck. Konstruktionen är unik och kanonen består av en indirekt upphettad diodkanon och en "switch mode" strömkälla. Tekniska data för svetsmaskinen finns i tabell 6-1. En skiss av elektronkanonen visas i figur 6-2.

Katoden hettas upp och emitterar då elektroner. Dessa accelereras upp till cirka 2/3 av ljushastigheten med hjälp av en hög accelerationsspänning. Elektronerna passerar genom ett hål i anoden och vidare genom elektronkanonen. Den övre spolen fokuserar elektronstrålen för att passera tryckstegen N1 och N2 och den nedre spolen fokuserar elektronstrålen mot arbetsstycket. De övre spolarna och den nedre spolen centrerar elektronstrålen exakt i centrum av de små hålen genom N1 och N2. Termoelement övervakar eventuella temperaturstegringar vid N1, N2 och N3. Signalen från termoelementen har två gränser: en för alarm och en för systemstopp /6-4/.

Tabell 6-1. Tekniska data för EBW-maskin.

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Utvecklad av | TWI |
| Levererad till SKB | 1997 |
| Driftsatt | 1998 |
| Effekt | 100 kW |
| Accelerationsspänning | 200 kV |
| Strålström | 500 mA |
| Katodupphettning | RF 84 MHz, 250 W |
| Katodmaterial | Keramisk LaB ₆ |
| Filamentmaterial | Volframlegering |
| Volym svetskammare | 180 m ³ |
| Kammartryck | 0,1 mbar |
| CNC-system | Siemens 840C |
| Reglersystem | TWI |
| Övervakningssystem | NI Labview 4.0/TWI |



Figur 6-2. Skiss av elektronkanon.

Utvecklingen av svetssystemet pågår på TWI och i Kapsellaboriet. Arbetet har hittills omfattat följande områden:

- Ny typ av katod (TWI).
- Utrustning för mätning och oscillering av elektronstrålen (TWI).
- Sänkt tryck i svetskammaren (Kapsellaboriet).
- Svetsparametrar efter installation av ny katod (Kapsellaboriet).
- Kartläggning av elektronstrålens form (Kapsellaboriet).
- Svetsförsök med oscillerande elektronstråle på kopparblock och kopparlock (Kapsellaboriet).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam menar i sin granskning att det återstår stora insatser när det gäller fogning av kapseln. Fortsatta undersökningar bör genomföras med friction stir welding och elektronstrålesvetsning tills en av metoderna visat sig ge helt tillfredsställande resultat. En ingående förståelse av de mekanismer som ger upphov till defekter i kapseln måste byggas upp.

SKI menar att dokumentationen av svetstekniken för EBW, rörande såväl uppnådd utveckling som de planerade insatserna av elektronstrålesvetsningen, är alltför knapphändig och uppmanar SKB att sammanställa de uppnådda resultaten snarast.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2001

Resultaten av utvecklingsarbetet när det gäller elektronstrålesvetsning har beskrivits i två rapporter /6-3, 6-4/. SKB har sedan 2001 arbetat med att undersöka mekanismerna som ger upphov till defekter i svetsen. Detta har skett i nära samarbete med TWI. Utvecklingen har inneburit flera tekniska genombrott som rör generering och styrning av elektronstrålar samt processkontroll. De viktigaste delarna har varit utveckling av teknik för att styra elektronstrålens energifördelning samt installation och användande av system för att mäta och oscillera elektronstrålen.

Arbets sättet med parallell utveckling av process- och svetsssystem har inneburit att utvecklings- takten hämmats genom att obeprövade lösningar implementerats i systemet. Detta har i sin tur lett till problem med tillgängligheten. Ett program för att komma tillrätta med dessa problem har initierats.

En ny typ av katod har utvecklats av TWI under år 2002. Målet för utvecklingsarbetet med denna katod var att åstadkomma en elektronstråle som ger en rund svetsprofil i roten (elektronstrålens botten) och som har en rotradii större än 2,5 millimeter. Risken för rotfel blir då minimal. Katoden gav vid tester en mycket bättre svetsprofil än tidigare. Rotradien översteg i de flesta fall två millimeter. Trots att målet inte nåddes när det gällde rotradien ansågs katoden ändå vara tillräckligt bra. Detaljer kring katodens utformning och elektronstrålens form kan för närvarande inte beskrivas, eftersom TWI undersöker möjligheten att söka patent.

TWI har utvecklat en utrustning för att mäta och oscillera elektronstrålen. Utrustningen installerades och sattes i drift i Kapsellaboratoriet i september 2003. Den består av en spole för att oscillera elektronstrålen, en mätsond, två datorer (en för styrning av processen och en för insamling av svetsdata), programvara för styrning och datainsamling samt manöverkonsol, elektronikskåp och kablage mellan enheterna. När elektronstrålens form ska mätas monteras en hållare, inklusive en mätsond på tre stycken stänger, på spolens förlängning in i svetskammaren, se figur 6-3. Manöverkonsolen, se figur 6-4, har bytts ut och ersatts med en ny större konsol, som har anpassats för den nya utrustningen.



Figur 6-3. Spole med hållare för strålavlänkning.



Figur 6-4. Manöverkonsol för EBW-systemet.

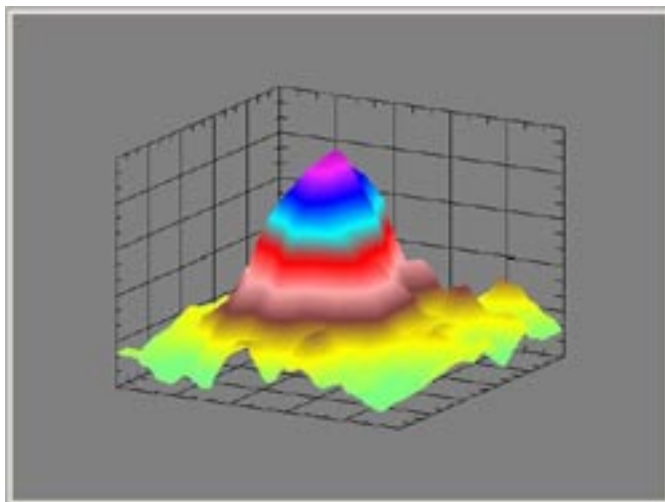
Då svetskammaren byggdes var rekommendationen att trycket skulle uppgå till högst 0,5 millibar. Vid utprovningen visade det sig att trycket måste understiga 0,2 millibar för att svetsprocessen skulle bli stabil. Om trycket överstiger 0,25 millibar, samtidigt som svetsseffekten är maximal, uppstår en omfattande plasmabildning i området kring svetsmältan. Plasman stör elektronstrålen och därigenom försämras också svetskvaliteten. Ytterligare en vakuumpump installerades. Tillsammans med andra åtgärder, som läcksökning och tätning av svetskammaren samt en mindre ombyggnad, förbättrade detta vakuumnivån i svetskammaren till cirka 0,05 millibar.

Elektronstrålens elektronfördelning har mätts regelbundet för att kartlägga sambandet mellan elektronfördelning och svetskvalitet samt för att bedöma katodens skick, se figur 6-5.

Program

Elektronstrålesvetsmaskiner i standardutförande är normalt tillförlitliga. Utrustningen på Kapsellaboratoriet är betydligt mer komplicerad än en standardmaskin. Den kan närmast liknas vid en prototyp och driftsäkerheten har därför varit sämre än önskvärt. Under hösten 2004 planeras ett antal åtgärder för att förbättra tillförlitligheten:

- Utveckla och förbättra tillverkningen av katoder. Arbetet som pågår vid TWI har som mål att kunna precisionstillverka katoder så att de genererar likformiga elektronstrålar och svetsresultat vid lika parameterinställning. Katoderna ska också kunna monteras i svetsmaskinen utan individuell justering.
- Utveckla, prova och bygga om högspänningskabelns anslutning i svetskanonen så att risken för överslag minimeras.
- Bygga om strålgenereringssystemet så att strålgenomföringen i elektronkanonen förenklas och risken för överslag minimeras. Detta arbete beräknas ske under hösten 2005 för att inte försena demonstrationsserien med 20 locksvetsar.



Figur 6-5. Elektrontäthet i strålens fokuspunkt. Grön färg representerar låg elektrontäthet och violett hög elektrontäthet.

6.2.2 Svetsprocessen

Parallellt med att utveckla utrustningen för elektronstrålesvetsning har vi också utvecklat själva svetsprocessen. Det är först under år 2003 som alla viktiga processparametrar kunnat identifieras och styras, så att uppkomsten av oacceptabla defekter i svetsen kan förhindras. En viktig del av arbetet har varit att systematiskt prova olika kombinationer av processparametrar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam menar i sin granskning att det återstår stora insatser för fogning av kapseln. Fortsatta undersökningar bör genomföras med friction stir welding och elektronstrålesvetsning tills en av metoderna visat sig ge helt tillfredsställande resultat. En ingående förståelse av de mekanismer som ger upphov till defekter i kapseln måste byggas upp.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2001

Svetsprocessen har utvecklats genom provsvetsningar, där lock i full skala satts ihop med avkortade cylindrar. Provs svetsningar har också utförts i kopparblock vid utveckling av och prov med nya svetsparametrar. Fram till slutet av februari 2004 hade 29 lock och 172 kopparblock svetsats. Samtliga svetsar har undersökts med oförstörande provning i form av radiografering, ultraljud och okulärkontroll. Dessutom har svetsens struktur undersökts med hjälp av etsade makroprov från valda delar. Provstavar från två locksvetsar har även dragprovats (L026 och L028).

Nya svetsparametrar har provats ut efter att den nya typen av katod installerats. Detta har gjort det möjligt att svetsa vid höga effekter och höga svets hastigheter. Under sådana förhållanden stelnar svets smältan snabbare. Vid svets hastigheter högre än 300 millimeter per minut försvann i stort sett problemen med uttrinnande svets smälta och inre kaviteter. Den inre svets kvaliteten är numera mycket homogen. Efter att den nya utrustningen för att oscillera elektronstrålen installerats har ett antal olika varianter av strålmönster provats. Syftet är att styra hur svetsens yta stelnar, se vidare nedan.

Provs svetsning med oscillerande elektronstråle har gjorts i ett antal kopparblock. Proven utfördes med hjälp av en portabel utrustning från TWI, som anslöts till SKB:s svetsmaskin. Efter att ha provat ett antal olika parametersättningar kunde god svets kvalitet åstadkommas. Svetsen var homogen och svetsytan var slät med konkav kontur, se figur 6-6 till 6-8.



Figur 6-6. Svets TB 122. Svetsförsök med oscillerande stråle.



Figur 6-7. Makroprov av svets TB 122. Svetsförsök med oscillerande stråle.

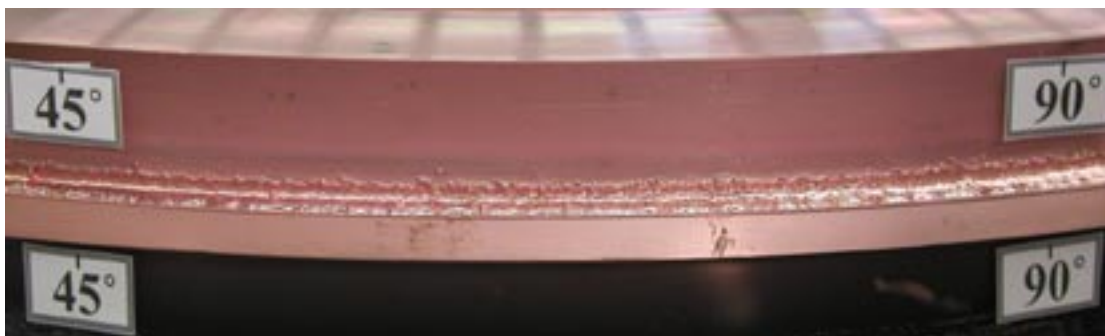


Figur 6-8. Radiografering av svets TB 122. Genom att avbryta svetsningen får man kvar den hålighet som hela tiden omger elektronstrålen under svetsningen i materialet. Detta ger en avbildning av elektronstrålens form. Den runda formen är viktig för att undvika rotfel.

Genom att använda en oscillerande elektronstråle kan vi få ett homogent svetsgods. Vid processen behandlas svetsytan genom omsmältning, vilket ger en jämnare yta. Fyra olika strålmönster har provats med energifördelning cirka 91 procent för svetsning och 9 procent för ytbehandling. Prover med oscillerande elektronstråle har utförts i två locksvetsar (L028 och L029). Locksvets L028 har svetsats både med och utan oscillerande elektronstråle med svets hastigheterna 250, 275, 300 och 325 millimeter per minut, se figur 6-9 och figur 6-10. Svetsens yta är jämn i det oscillerade området. Däremot är den grov i det parti som är svetsat utan oscillering. Där bildades också en mindre mängd ytnära bindfel när svets hastigheten uppgick till 325 millimeter per minut. Svetsens inre kvalitet är som helhet god, även om ett antal mindre diskontinuiteter förekommer i området med rotations hastigheterna 250 och 275 millimeter per minut. Den andra locksvetsen (L029) har svetsats med svets hastighet 300 millimeter per minut. Såväl svetsens homogenitet och svetsyta är som helhet utmärkta, se figur 6-11.

Resultatet av dessa försök visar att det numera är möjligt att åstadkomma svetsar av mycket hög kvalitet med homogent svetsgods och god svetsyta. De enstaka fel som förekommer beror företrädesvis på maskinfel.

Samtliga svetsprov i kopparlock har undersökts med oförstörande provning. Resultaten visar att de typiska diskontinuiteter som påvisats består av rotfel, inre kaviteter, kaviteter som hänger samman med ytan samt ytnära porer. Efter införande av den nya katoden och svetsning med oscillerande elektronstråle vid hög svets hastighet är svetsgodset numera mycket homogent. Ett exempel på god homogenitet kan ses i figur 6-8, där svetsgodset är helt fritt från diskontinuiteter. Med hjälp av radiografering kan även formen på elektronstrålen studeras. Genom att avbryta svetsningen får man kvar den hålighet som hela tiden omger elektronstrålen, vilket är en användbar teknik för att förstå sambandet mellan strålens form och svetsens kvalitet.



Figur 6-9. Locksvets L028. Parti svetsat med oscillerande elektronstråle.



Figur 6-10. Locksvets L028. Parti svetsat utan oscillerande elektronstråle.



Figur 6-11. Locksvets L029, svetsad med oscillerande elektronstråle.

Samtliga svetsprov kontrolleras okulärt före och efter bearbetning för att vi ska kunna upptäcka ytbrytande. Svetsytorna fotograferas även digitalt för att vi ska kunna bedöma svetsarnas form och utseende. Efter införandet av svetsning med oscillerande elektronstråle är svetsytorna numera relativt släta före bearbetning. Arbetsmånen för att uppnå renbearbetade kapselytor är mer än tillräcklig, se figur 6-11. Efter renbearbetning har enstaka små porer (< 1 millimeter) observerats på svetsens yta.

Makroprov i svetsens tvärsnitt tas ut från varje provsvetsning för att kartlägga sambandet mellan parametersättning och svetsform samt för att i förekommande fall studera diskontinuiteter, se figur 6-12. Ett längdsnitt har tagits ut för att studera eventuella variationer i svetsdjup. Svetsens form, djup, bredd och rotradie, baserat på parameterinställningar, har kartlagts och kan förbestämmas med stor säkerhet. Rotradien påverkas också av katodens utformning och slitage.

Makroprov i svetsens längdsnitt visar att svetsdjupet varierar med fyra millimeter från den obearbetad ytan, se figur 6-13. Svetsgodset är mycket homogent har inslag av mikroporer med en diameter som understiger 0,2 millimeter. Mikroporerna är i huvudsak orienterade i rotområdet.



Figur 6-12. Locksvets L027. Tvärsnitt av svetsen. Makroprovet visar ett svetsdjup av 66 millimeter och svetsen har en rotradie på 1,5 millimeter, vilket minimerar risken för rotfel.



Figur 6-13. Locksvets L026. Längdsnitt i svetsen, längd cirka 200 millimeter. Den grova strukturen visar svetsens inträngning.

Dragprovstavar har tagits ur två locksvetsar (L026 och L028). L026 har svetsats utan oscillering och L028 med oscillering. Olika rotationshastigheter har också provats. Ingen signifikant skillnad i hållfasthetsegenskaper kopplat till svetshastigheten eller stråloscilleringen har kunnat påvisas. Dragproven ur locksvets L028, se figur 6-14 och tabell 6-2, har visat något högre brottgräns och förlängningsgräns jämfört med locksvets L026.

Slutsatserna från dragproven är:

- Brottet skedde i svetsgodset.
- Svetsgodsets hållfasthetsnivå framgår av tabell 6-2.
- Hållfastheten i svetsgodset är likartad i svetshastigheter mellan 250–325 millimeter per minut.
- Svetsgodsets hållfasthet i överlappsområdet är ungefär densamma som för det övriga svetsgodset.

Program

Elektronstrålesvetsning som metod är känd för sin goda repeterbarhet och tillförlitlighet när väl processparametrarna är fastställda. De utförda svetsproverna bekräftar den goda repeterbarheten, trots bristerna i precisionen vid tillverkningen av olika katoder. I den planerade demonstrationsfasen kommer metodens potential som produktionsmetod att visas på cirka 20 svetsar. Den resulterande kvaliteten ska undersökas för vidare statistisk bearbetning i syfte att samla indata till säkerhetsanalysen inför ansökan om att få bygga inkapslingsanläggningen. Demonstrationsfasen kommer enligt planerna att genomföras under 2004 och början av 2005.



Figur 6-14. Dragprov locksvets L028. Rotationsläge 310°.

Tabell 6-2. Dragprov ur locksvets nr L028 svetsad med oscillerande elektronstråle.

| Prov nr/läge i locksvetsen | Svetshastighet mm/min | Brottgräns R_m MPa | Förlängnings- gräns $R_{p0,2}$ MPa | Brottförlängning A_5 % |
|---|--------------------------|----------------------------|--|--------------------------------|
| S3/12.5° Slope-out zon | 250/325 | 185 | 70 | 26 |
| S1A/40° | 250 | 189 | 65 | 29 |
| S1B/40° | 250 | 190 | 64 | 30 |
| S2A/310° | 325 | 191 | 67 | 29 |
| S2B/310° | 325 | 188 | 66 | 29 |
| Referensprov i grundmaterial nära svetsområdet: | | | | |
| L1/40° lock | – | 203 | 85 | 68 |
| L2/310° lock | – | 205 | 82 | 52 |

Ett program för att optimera svetsparametrarna och fastställa toleranser för parametersättning har utarbetats. Programmet omfattar en försöksserie med två nivåer (hög och låg). Skillnaden från normal parameternivå kommer att sättas till cirka fem procent. Tillåtna avvikelser från angivna parametrar kan därefter bestämmas och ligga till grund för framtagning av en WPS (Welding Procedure Specification).

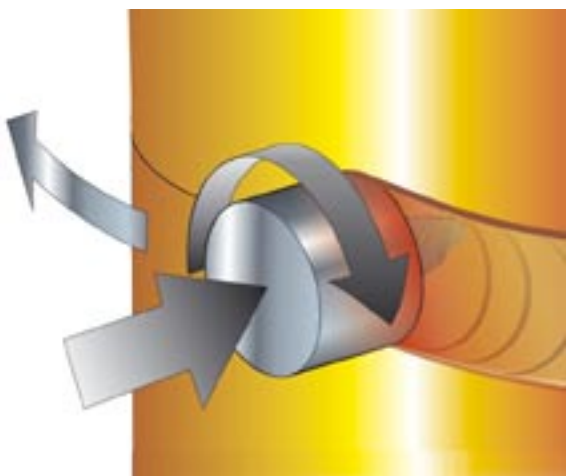
6.3 Friction stir welding

SKB har sedan år 1997, i samarbete med TWI, utvecklat friction stir welding för att försluta kopparkapslar för använt kärnbränsle. Friction stir welding uppfanns 1991 på TWI och är en termomekanisk fasttillståndprocess, dvs inte en smältsvetsmetod. Detta innebär att de olägenheter som uppstår vid smältsvetsning, till exempel ogynnsam struktur och storlek hos kornen samt segringsfenomen, kan undvikas. Den resulterande strukturen i koppar vid friction stir welding liknar den struktur som erhålls vid varmformning av kopparkomponenterna i kapseln. Svetsmetoden kan också användas för att foga botten till kopparkapslarna.

En anledning till det snabbt ökande användandet av friction stir welding inom industrin är att metoden har få processparametrar. Detta leder till att svetsprocessen kan styras enkelt. Svetsverktyget roterar med ett specifikt antal varv per minut och förflyttar sig längs fogen med en konstant hastighet. Verktyget har också en konstant vinkel till materialet. Den ledande sidan av verktygsskuldran befinner sig ovanför kapselytan, så att verktygsskuldran "surfar" på ytan. Verktygsskuldrans position i relation till kapselytan kontrolleras sedan med en specifik nedåtriktad kraft enligt figur 6-15.

6.3.1 Verktyg

FSW-verktyget som används vid svetsning består av två delar, en konisk tapp och en skuldra, se figur 6-16. Pinnens funktion är att genom friktion värma upp materialet och genom sin form tvinga materialet att flyta runt dess form och skapa en fog. Skuldrans funktion är att genom friktion värma upp materialet och förhindra att detta pressas ur svetsfogen. Det råder inget tvivel om att verktyget utgör den viktigaste delen i FSW-processen. Verktygets delar måste tåla den höga processtemperaturen (800–900 °C) liksom de komplexa krafter de utsätts för när upp till fyra meter svets produceras på ungefär 45 minuter.



Figur 6-15. Skiss av FSW-processen.



Figur 6-16. FSW-verktyget.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Utvecklingen av den alternativa metoden att försluta kopparkapslar genom att foga koppar med friction stir welding och samarbetet med TWI beskrevs ingående i Fud 2001. SKI framhöll i sin granskning vikten av att undersöka fogen, se avsnitt 6.3.3 och 6.4.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2001

Utformningen och tillverkningen av en tapp, i enlighet med de krav som ställs, har varit föremål för ett intensivt utvecklingsprogram som genomförts under perioden 2001–2003. Det tekniska genombrottet kom i och med utvecklingen av en tapp som klarade att svetsa 50 millimeter tjock koppar. Tappen är en variant av MX-Triflute™. Effektiviteten och tillförlitligheten hos tappen utgör grunden för ett beviljat patent (SKB/TWI) /6-5/.

Valet av lämpliga material för tillverkningen av FSW-verktyget visade sig vara en utmaning. Ett flertal material med tillräcklig hållfasthet vid höga temperaturer har utvärderats som material i pinnen. En nickelbaserad superlegering (Nimonic 105) valdes, eftersom den visade sig kapabel att producera kapselsvetsar utan spår av nötning eller brott.

Program

Nimonic 105 kommer att användas i SKB:s utvecklingsprogram under 2004. Det finns dock andra material som har vissa fysikaliska egenskaper som är överlägsna dem hos Nimonic 105. Utvärderingen av alternativa material kommer därför att fortsätta. En ytbehandlingsmetod har med viss framgång använts för att öka ythårdheten hos tappar tillverkade av legeringen Nimonic 105. Andra ytbehandlingsmetoder kommer att utvärderas med avseende på förmågan att öka livslängden på FSW-verktygets tapp och därmed minska risken för fel i processen.

Den geometri som utvecklats för tappen innebär att svetsar med utmärkta egenskaper produceras. Arbetet med att förbättra tappens beständighet, geometri och storlek fortsätter. Inga stora förändringar av tappen förväntas dock under 2004–2005.

Verktygsskuldran tillverkas av en maskinbearbetad volframlegering med hög smältpunkt som snabbt når hög temperatur. Verktygsskuldran alstrar huvuddelen av friktionsvärmerna och det är osannolikt att skuldrans form eller dimensioner kommer att förändras avsevärt den närmaste tiden.

6.3.2 Svetsutrustning

Två svetsmaskiner har använts vid utvecklingen av friction stir welding sedan Fud 2001: En utvecklingsmaskin hos TWI användes 2001–2002 och utvecklades i januari 2003 samt en produktionsanpassad maskin som driftsattes i april 2003 i Kapsellaboratoriet.

Specifikationerna för den svetsmaskin, som beskrevs i Fud 2001 och som utvecklades av TWI, togs fram i samband med tidiga försök att svetsa ihop 50 millimeter tjocka kopparplåtar med en ombyggd fräsmaskin. Viktiga designparameter var tillräcklig hållfasthet och styvhet för att motverka krafterna som uppkommer i FSW-processen utan att maskinen deformeras.

Under utvecklingsprogrammet som bedrivits med svetsmaskinen vid TWI har 100 millimeter höga ringar (uttagna från en kapsel) monterats två och två på varandra och svetsats ihop. En milstolpe för programmet var när ett riktigt lock svetsades fast på en ring i januari 2003.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 anges att det är möjligt att sammanfoga 50 millimeter tjock koppar med FSW och att processen sannolikt kan utvecklas till en alternativ produktionsmetod för svetsning av kopparkapslar. Arbetet, som bedrevs på en utvecklingsmaskin framtagen vid TWI, var inriktat

på fortsatt utvecklingen av verktyg och processparametrar. Svetsförsök planerades i både 50 och 30 millimeter tjocka kopparrör. Vid denna tidpunkt fanns inte någon lösning för hur utgångshålet, som lämnas av verktyget vid svetsavslut, skulle hanteras. Planer fanns på att uppföra en helt ny FSW-utrustning speciellt anpassad för ändamålet vid Kapsellaboratoriet. Undersökningar av FSW-materialets hållfasthetsegenskaper pågick.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

År 2001 kunde man visa att friction stir welding är en lovande teknik för att försluta kopparkapslar också i produktion. Tekniken hade presenterats för SKI, som gav sitt stöd för fortsatt utveckling. Ett beslut fattades att överföra FSW-tekniken till Kapsellaboratoriet för fortsatt utveckling. Den information som tagits fram inom ramen för svetsningarna av ringar på TWI användes för att ta fram driftspecifikationer för en ny FSW-maskin. Den nya maskinen utvecklades och byggdes av Esab under 2002. Svetsmaskinen har varit i drift på Kapsellaboratoriet sedan april 2003. Den har fungerat utmärkt och överföringen av tekniken från experiment-maskinen till en produktionsanpassad maskin har fungerat bra.

FSW-maskinen har en unik utformning med avseende på hållfasthet och styvhet som säkerställer att den klarar produktionssvetsning. Svetsmaskinen, som visas i figur 6-17, har en effekt på 110 kW, vilket gör den till en av de mest kraftfulla svetsmaskinerna i världen. Vid drift utnyttjas endast 35 kW, eftersom värmetillförseln måste begränsas.

Program

FSW-maskinens potential som produktionsmaskin kommer att visas på en försöksserie om cirka 20 svetsar under driftliknande förutsättningar. Arbetet innebär:

- Utveckling och förbättring av mjukvara för att styra och övervaka processen.
- Förbättringar av systemet för processövervakning.
- Förbättringar för att kunna anpassa den konstanta svetsvinkeln till svetsriktningen.



Figur 6-17. FSW-maskinen i Kapsellaboratoriet.

6.3.3 Svetsprocessen

De inmatade parametrar som kontrolleras är:

- Verktygets nedåtriktade kraft (svetskraft).
- Spindels varvtal.
- Svets hastighet.

Förutom inmatningsparametrarna mäts även de viktiga resultaten. Dessa processindikatorer är:

- Verktygstappens temperatur.
- Vridmotstånd/moment på den roterande spindeln.
- Framförningskraften på verktygspinnen.
- Verktygsskuldrans position (djup) i relation till kapselytan.

Ett mål för utvecklingsarbetet har varit att hålla parametrar konstanta under hela svetsförloppet. Viktiga punkter i utvecklingsarbetet har varit att:

- Minska risken för att FSW-verktygets pinne utsätts för höga temperaturer som kan begränsa dess livslängd.
- Uppnå jämn svetskvalitet och kornstorlek hos svetsgodset.
- Utveckla en enkel och robust metod för att övervaka processen.

Nedan följer en beskrivning av de olika sekvenserna i svetsförloppet och hur dessa kontrolleras:

- **Positionering och uppvärmning.** Ett pilothål borras ovanför foglinjen för att underlätta positioneringen av FSW-verktygets tapp och minska risken för att pinnen skadas. Verktyget roteras och trycks in i pilothålet tills svetskraften uppnås. Svetskraften behålls under hela uppvärmningssekvensen.
- **Start och acceleration.** När en bestämd svetstemperatur har uppnåtts startar accelerationssekvensen. Svets hastigheten är där en funktion av svetstemperaturen.
- **"Steady-state"**. Svetstemperaturen kontrolleras genom att värmeförseln (spindelns vridmotstånd x dess rotationshastighet) hålls konstant, detta uppnås genom små variationer i svetskraften.
- **Avslutning.** När svetsningen avslutas, och verktyget avlägsnas från kapseln, bildas ett utgångshål. I och med att utgångshålet inte får finnas kvar i fogen parkeras verktyget ovanför foglinjen, se figur 6-18. Detta område bearbetas liksom startområdet bort efter svetsningen.



Figur 6-18. Startområdet (höger) och utgångshålet (vänster) ovanför foglinjen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI påpekade vikten av att undersöka fogen efter svetsning med friction stir welding för att fastställa om främmande partiklar från verktygen eller oxidation förekommer. Även undersökningar av materialets sammansättning och förekomsten av föroreningsämnen i svetsfogen efterlystes.

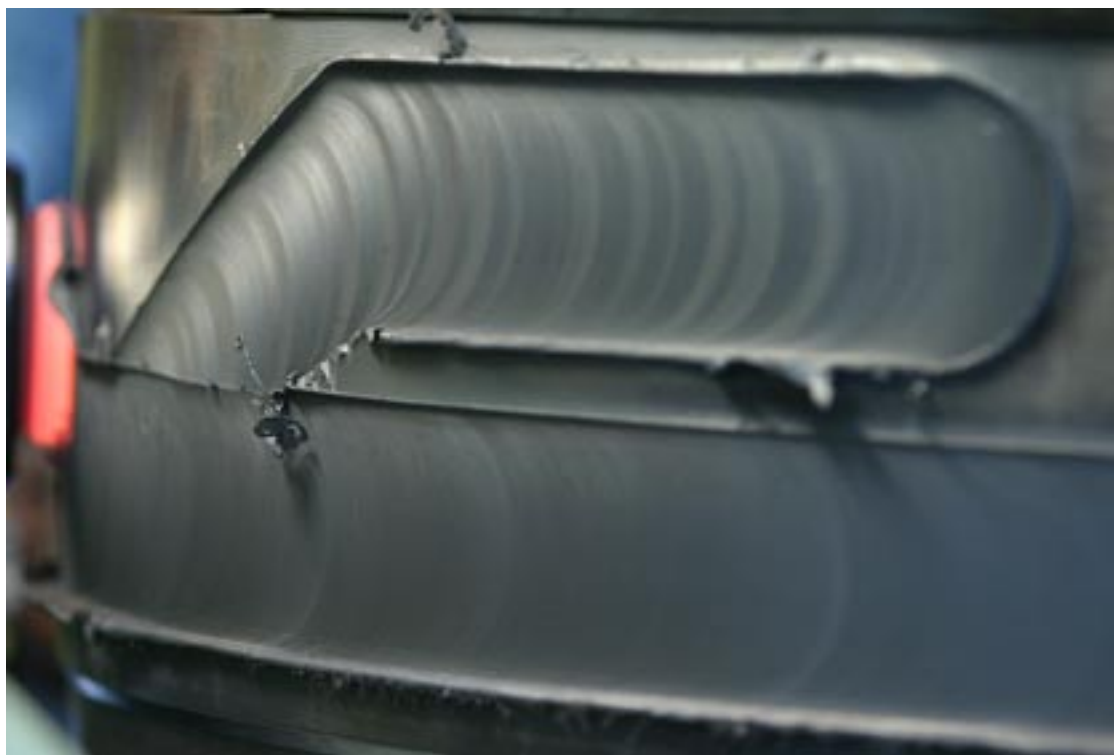
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Utvecklingen under perioden från mars 2003 vid Kapsellaboratoriet har inneburit att betydligt mer erfarenheter kring svetsning med FSW i full skala kunnat byggas upp. Tack vare den nya svetsmaskinen och att resurser för oförstörande provning finns tillgängliga har projektet kunnat drivas under rationella former både vad det gäller genomförande av svetsprov och utvärdering av dessa.

En viktig milstolpe i inkapslingstekniken har uppnåtts genom att en komplett fullstor kapsel tillverkats och förslutits med friction stir welding enligt en kvalitetsplan. De ingående komponenterna har alltså uppfyllt SKB:s nuvarande kvalitetskrav. FSW-tekniken har dessutom demonstrerats som svetsmetod för kapselns botten, se figur 6-19. Inga betydande diskontinuiteter har kunnat påvisas i de utförda lock- och bottenhetsarna.

Prov har visat att en två millimeter bred spalt med ett djup på 32 millimeter i foglinjen inte påverkar svetsens kvalitet. Detta visar att processen fungerar med stora toleranser och att det är möjligt att reparera volymetriska defekter.

Risken för att åstadkomma defekter under svetsning är förhöjd under starten. När väl processen är inom parameterfönstret (steady state) och inga störningar inträffar har inte någon risk för defektbildning observerats.



Figur 6-19. Startsekvens samt FSW-verktyg på väg upp till parkeringspositionen vid bottenhetsen.

En begränsning i utvärderingen av svetsarna fram till 2004 har varit att endast förekomst av volumetriska fel kunnat detekteras med oförstörande provning (radiografering), eftersom tekniken för ultraljudsprovning inte var färdigutvecklad. Sedan början av 2004 har ultraljudsprovning av svetsarna kunnat ske. Förstörande provning (makrosnitt, se figur 6-20) används men eftersom en locksvets är mer än tre meter lång kan endast stickprov göras. Ytterligare förstörande provning har utförts. Dragprov (45 millimeter breda) från locksvetsar uppvisar ingen reduktion i brotthållfasthet jämfört med grundmaterialet. Provtavarna brister i ett område utanför svetszonen i den värmepåverkade zonen, se figur 6-21. Dragprovresultaten för locksvetsarna bekräftar svetsarnas goda kvalitet.

Ett problem som uppstod när riktiga lock och inte ringar skulle svetsas var för mycket skägg på kapselsidan. Detta var ett resultat av den stora massan koppar i locket, den stora termiska konduktiviteten hos koppar och locket kylklampar. Tillsammans orsakade dessa att kapseln blev varmare än locket. Eftersom koppar har en relativt stor termisk utvidningskoefficient ($17,7 \cdot 10^{-6}$ per °C) expanderade kapseln mer än locket. Det extra skägget gav upphov till över-skottsvärme, vilket hade en skadlig inverkan på stabiliteten hos svetsprocessen. Detta problem löstes genom att mekaniskt koppla locket och kapseln med en fals. Denna modifiering används numera med framgång i Kapsellaboratoriet. Foglinjen flyttades till ett läge motsvarande det som används vid elektronstrålesvetsning, alltså högre upp i locket. Därmed minskar den asymmetriska uppvärmningen och utvidningen av lock och kapsel, vilket ger en stabilare process. Förfarandet ger dessutom förbättrade kontrollmöjligheter med oförstörande provning.

Som beskrivits tidigare placeras utgångshålet på ett avstånd från svetslinjen. Detta koncept överfördes till Kapsellaboratoriet under 2003 och innebär att svetsen startar ovanför foglinjen, se figur 6-20, med avsikten att isolera svetsdefekter, men också för att få en möjlighet att kunna avbryta processen i ett tidigt skede om den inte konvergerar mot en stabil process. Det är möjligt att starta en ny svets i en ny startpunkt utan att kassera, eftersom det påverkade området bearbetas bort efter svetsoperationen när locket bearbetas och får sina slutliga dimensioner.

Efter att ett lock svetsats på TWI och elva lock svetsats i Kapsellaboratoriets nya svetsmaskin, kan man sammanfatta FSW-processen som robust och stabil. Den är emellertid inte färdigutvecklad när det gäller att fullständigt automatisera processen och därmed eliminera den



Figur 6-20. Makrosnitt av FSW-svets, som visar den finkorniga struktur som erhålls.



Figur 6-21. Dragprov från locksvets.

mänskliga faktorn. Erfarenhet har dock visat att det går att svetsa med stor repeterbarhet och tillförlitlighet trots denna begränsning. Anledningen är att den enda inmatningsparametern som ändras under en svetscykel är den nedåtriktade kraften och att dess tolerans är relativt stor.

Problemet med utgångshålet har lösts genom att det parkeras ovanför foglinjen vilket medför att det bearbetas bort då locket får sina slutliga dimensioner. Även startsekvensen sker på denna höjd ovanför foglinjen vilket innebär att eventuella startdefekter bearbetas bort.

Program

En viktig fas av utvecklingsprogrammet är att optimera svetsparametrarna och fastställa toleranser för parametersättning. Ett program för detta har utarbetats där det ingår en försöks-serie med tre nivåer på utvalda parametrar. Tillåtna avvikelser från angivna parametrar kan därefter bestämmas och ligga till grund för framtagning av en WPS (Welding Procedure Specification). Denna del av programmet beräknas genomföras under 2004, se även /7-1/.

I den efterföljande demonstrationsfasen, som sker under seriemässiga former, kommer metodens potential som produktionsmetod att visas på cirka 20 svetsar och den resulterande kvaliteten undersöks för vidare statistisk bearbetning för att ge indata till säkerhetsanalysen SR-Can.

Materialutvärdering som omfattar oförstörande och förstörande provning kommer att genomföras för att fullständigt utvärdera integriteten hos locksvetsar producerade med friction stir welding. Metallurgiska undersökningar genomförs på ett strukturerat sätt så att integriteten hos svetsarna kan relateras till svetsförhållandena. Mycket av denna utvärdering kommer att genomföras av svenska forsknings- och utvecklingscentrum och svenska universitet. Parallellt med dess studier kommer mekaniska tester, korrosionstester, kryptestning och kemiska analyser av svetsen att genomföras.

Tekniker för oförstörande provning, så som radiografering och ultraljud, utvecklas för att kunna upptäcka både volymetriska och andra defekter i svetsen. Resultaten från detta arbete kommer regelbundet att jämföras med metallurgiska undersökningar för att få fram defektbeskrivningar för FSW-processen. Informationen samlas i en katalog över fysikaliska egenskaper hos FSW-svetsar.

6.4 Oförstörande provning av förslutningssvetsen

Arbetet med oförstörande provning vid Kapsellaboratoriet är inriktat mot provning av kapselns förslutningssvets. Under år 2003 har arbetet utökats från enbart provning av elektronstrålesvetsar till att även innefatta provning av svetsar gjorda med friction stir welding.

Arbetet som utförs inom oförstörande provning vid kapsellaboratoriet kan beskrivas enligt följande:

1. Utveckling av befintliga metoder och utprovning av nya metoder för oförstörande provning av förslutningssvetsen.
2. Tillämpning av oförstörande provning enligt fastställda procedurer för utvärdering av svetsprover.
3. Verifiering av provningsmetodernas tillförlitlighet.

De metoder som används vid kapsellaboratoriet är digital radiografering (RT), ultraljudsprovning med "phased array" teknik (UT) samt induktiv provning (ET).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Vid Kapsellaboratoriet pågår utveckling av metoder och utrustning för oförstörande provning av kapslar förslutna med elektronstrålesvetsning. Projektet planerades att avslutas i början av år 2004. Utvecklingsarbetet är nu färdigt med undantag för induktiv provning, som beräknas implementeras successivt under år 2004.

Dessutom noteras från Fud 2001 att ett projekt skulle påbörjas för utveckling av metoder och utrustning för oförstörande provning av kapslar förslutna med friction stir welding. Utvecklingsarbetet pågår och planeras vara avslutat under år 2004.

Vidare konstaterades att vid Uppsala Universitet pågår sedan fem år ett forskningsarbete kring ultraljudsprovning av elektronstrålesvetsade kopparkapslar. De resultat, som kommer fram inom projektet ska användas på Kapsellaboratoriet. Implementering av signalbehandlingsalgoritmer för ultraljudsprovning pågår för närvarande vid Kapsellaboratoriet.

Under 2000 initierades ett utvecklingsprojekt där Uppsala Universitet, Universitetet i Magdeburg och Kapsellaboratoriet i samverkan utvecklar tekniken att med virvelström påvisa ytnära diskontinuiteter i koppar. Utvecklingsarbetet har under perioden fortsatt och implementering av resultaten pågår vid Kapsellaboratoriet.

SKI saknar en sammanhållen dokumentation av erhållna resultat och erfarenheter från oförstörande provning. SKB har redovisat efterfrågade resultat i Projekt-PM TI-03-04 som gavs ut i maj 2003. Rapporten omfattar arbetet med oförstörande provning av kapseln fram till och med år 2002. Detta PM har även givits ut som rapport /6-6/.

Nyväunnen kunskap sedan Fud 2001

En milstolpe som uppnåtts är att provningsprocedurer har fastställts för röntgen och ultraljudsprovning av förslutningssvets gjord med elektronstrålesvets. För att undersöka OFP-metodernas detekteringsförmåga har en studie utförts där ett 40-tal indikationer från röntgen och ultraljud har studerats med avseende på diskontinuiteternas verkliga karaktär. Studien visar på god korrelation mellan indikationer erhållna med oförstörande provning och verkliga defektstorlekar. Dessutom bidrar undersökningarna även med underlag till defektbeskrivning för EBW-svetsar. En annan slutsats av undersökningen var att en mer utförlig studie bör utföras för att bestämma OFP-metodernas detekteringsförmåga. Det finns även skäl att vidare studera tekniken för digital radiografering med tanke på att forsknings- och utvecklingsinsatserna så här långt främst varit inriktade mot ultraljudsprovning.

Ovanstående har legat till grund för att ett projekt initierades under år 2003 vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) "NDT reliability". Projektet som är treårigt drivs med inriktning mot inspektion av svetsar gjorda med såväl elektronstrålesvetsning som friction stir welding. Programmet beskrivs närmare under rubriken utvecklingsprogram nedan.

Inom digital radiografering kommer liknande metodik initialt att användas på provning av FSW-svetsar som används för provning av EBW-svetsar. Dock görs en översyn av eventuella utvecklingsbehov inom projekt "NDT Reliability" som även behandlar övriga utvecklingsinsatser beträffande digital radiografering.

Inom ultraljudsprovning har utvecklingsinsatserna varit att ta fram metoder för inspektion av förslutningssvetsar gjorda med friction stir welding. För att skapa förutsättningar för utveckling av provningsmetodik införskaffades i slutet av år 2002 ett nytt phased array ultraljudssystem. Systemet motsvarar kraven för provning av friction stir welding avseende frekvensomfång och en betydligt förenklad programmering jämfört med det tidigare systemet. Med det nya systemet är det lättare att styra och fokusera ljudstrålen.

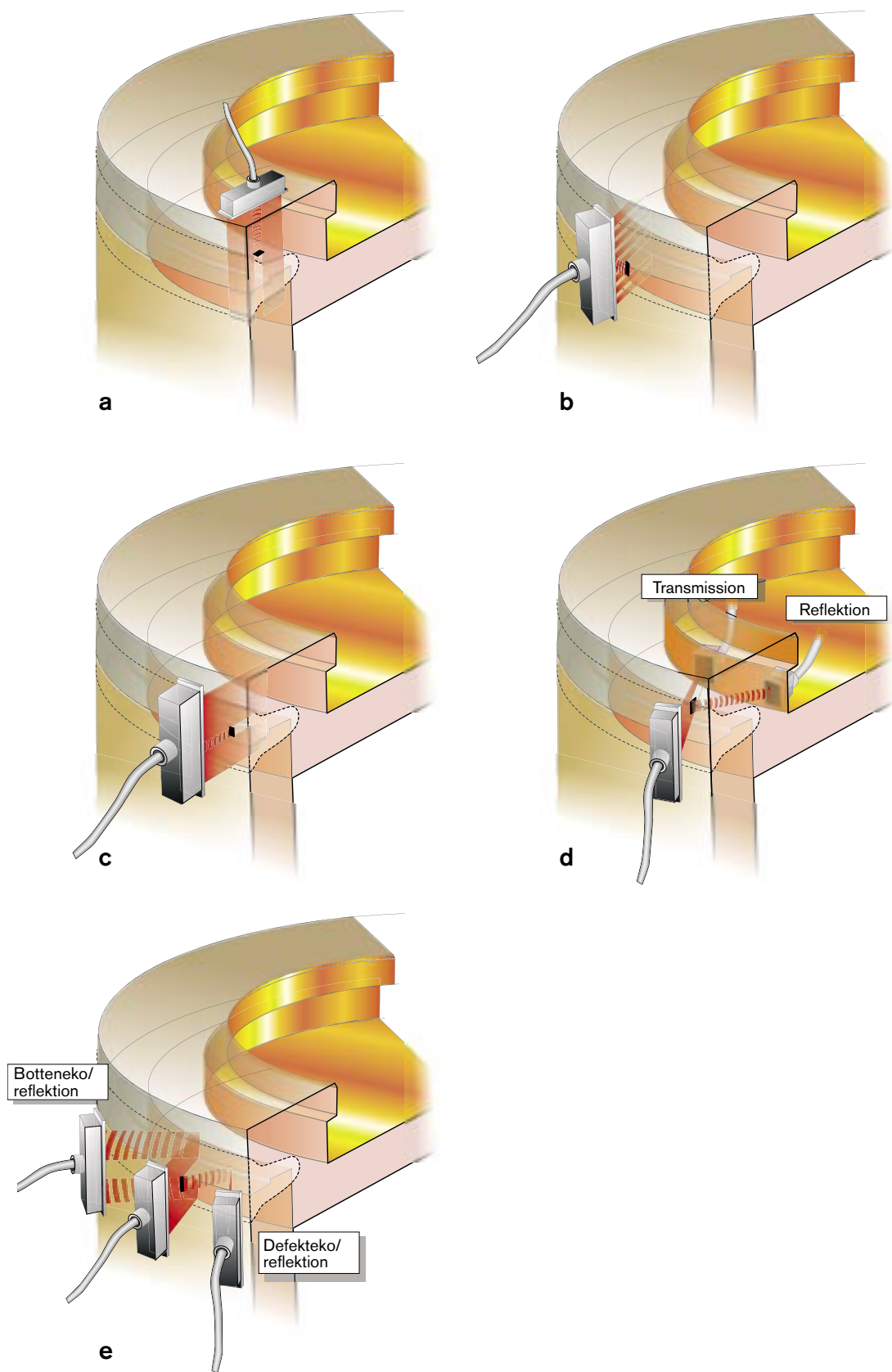
För att specificera lämplig provningsfrekvens vid ultraljudsprovning av FSW-svetsar har strukturens ljuddämpnings- och ljudspridningsegenskaper studerats. Motsvarande prov har även utförts på material från kopparlock och kopparcylindrar. Provningsmetoder har definierats utifrån de hittills kända typerna av defekter som kan uppstå i FSW-svetsar i koppar. Dessutom har teoretiskt möjliga defektformationer ansatts och provmetoder har tagits fram för att täcka även dessa hypotetiska fall.

Provmetoderna förbättras successivt genom att vi utvärderar de indikationer som erhålls och genom att vi jämför med resultaten från förstörande prov.

De metoder som för närvarande utvecklas och utvärderas baseras samtliga på phased array ultraljudsteknik och kan kortfattat beskrivas enligt följande:

- Provning av diskontinuiteter med huvudsaklig utbredning i radiell-tangentiell ledd. Denna provning utförs för närvarande från lockets ovansida med 5 MHz "array" som fokuseras mitt i svetsen, se figur 6-22a.
- Provning av diskontinuiteter med huvudsaklig utbredning i axiell-tangentiell ledd. För närvarande utprovas två metoder med provning från mantelytan:
 - Metod 1 är inriktad mot området 2–10 millimeter från ytan och utförs med 10 MHz "arraysökare" som styrs så att den simulerar en dubbelkristallsökare, se figur 6-22b.
 - Metod 2 är inriktad på den inre delen av svetsen och utförs med 5 alternativt 10 MHz "arraysökare" som fokuseras centralt i svetsen, se figur 6-22c.
- Provning av diskontinuiteter med huvudsaklig utbredning i radiell-axiell ledd. För närvarande utprovas två konfigurationer med 5 MHz "arraysökare":
 - Större delen av svetsvolymen undersöks med en "arraysökare" på mantelytan och en "arraysökare" på lockets insida. Avsökning sker med 45 graders infallsvinkel dels med direkt transmission och dels med reflektion mot eventuella diskontinuiteter, se figur 6-22d.
 - För den undre delen av svetsen utnyttjas rörets insida som reflektor för två arraysökare på mantelytan. Placeringen av mottagaren varierar beroende på om diskontinuiteternas ska detekteras genom defekteko eller bortfall av botteneko, se figur 6-22e.

Inom induktiv provning har projektet vid Uppsala Universitet avslutats med goda resultat /6-7/. Resultaten visar bland annat att provningsresultatet inte är beroende av materialets struktur, det vill säga svetsar och grundmaterial ger likvärdiga resultat. Avståndet från ytan till diskontinuiteter kan bestämmas med hjälp av signalernas fasvinkel och detta oberoende av diskontinuiteternas form. Vid Kapsellaboratoriet har utrustning för induktiv provning (ET-instrument med givare och datainsamlingssystem) anskaffats och för närvarande pågår utvärdering av fullskaliga svetsar.



Figur 6-22. Metoder för ultraljudsprovning av förslutningssvets gjord med friction stir welding.

Program

Utveckling av metodik och utrustning för oförstörande provning av FSW pågår vid Kapsellaboratoriet och beräknas vara avslutad under år 2004.

Som en del av programmet för att kartlägga OFP-metodernas tillförlitlighet (NDT Reliability) kommer vi att studera röntgenteknik för svetsar. Grunden för detta är att SKB inte utfört några studier kring röntgen, något som SKI påpekat vikten av. Vid röntgen av EBW-svetsar används 35 graders infallsvinkel mot svetsen vilket ger bra resultat. En frågeställning är om vi bör använda flera och andra strålningsriktningar för att bland annat kunna lägesbestämma felen. Dessa frågor har intresse framför allt för FSW-svetsar. Praktiska röntgenförsök är tidsödande och dyrbara och inte möjliga i ett rimligt tidsperspektiv eftersom möjliga strålningsriktningar begränsas av röntgenkammaren.

Denna del av projektet omfattar följande:

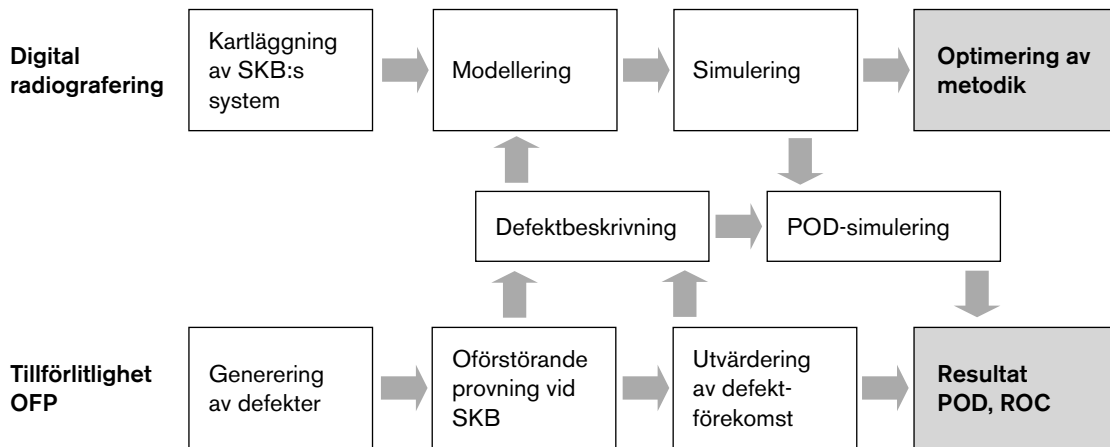
- Uppmätning av spektrumet hos strålkällan och detektorn vid Kapsellaboratoriet. Kartläggningen är inriktad mot linjäracceleratorns karakteristik, detektorns känslighet och rumsliga upplösning samt jämförelse av systemets prestanda mot standarder för traditionell filmbaserad röntgen.
- Anpassning av BAM:s simuleringsmodell med hjälp av de ovan uppmätta parametrarna.
- Simuleringsförsök för att studera detekteringsmöjligheterna vid olika röntgenkonfigurationer. Som indata vid simuleringen används rekonstruktioner av verkliga defekter som avbildats med högupplösande mikrofokusdatortomografi och som läggs in i en CAD-modell av svetsen. Valideringen av simuleringarna sker genom att jämföra simulerade bilder mot verkliga bilder erhållna i SKB:s system.
- Utvärdering av alternativa röntgenmetoder och detektorer.

En andra del av projektet handlar om bestämning av OFP-metodernas tillförlitlighet. I ett första steg undersöks provobjekt enligt fastställda provningsprocedurer vid Kapsellaboratoriet och resultaten dokumenteras noggrant. Provobjekten utgörs av locksvetsar med ett stort antal diskontinuiteter, som åstadkommit genom att variera viktiga parametrar utanför processfönstret för respektive svetsmetod. Syftet med detta angreppssätt är att säkerställa att olika typer av möjliga diskontinuiteter förekommer i provobjekten. I nästa skede undersöks defektförekomsten i detaljerna med datortomografi kompletterad med högupplösande mikrofokusdatortomografi. Som komplement utförs även undersökningar med andra OFP-metoder och förstörande prov genom metallografiska snitt och dragprov. Dessa data bearbetas sedan statistiskt. För att beskriva OFP-metodernas tillförlitlighet används POD-kurvor (probability of detection) och ROC-kurvor (risk of false calls), enligt tillämpliga rekommendationer i standard MIL-HDBK-1823 /6-8/. I den statistiska bearbetningen av data kommer tillförlitligheten av OFP-metoderna att belysas såväl var för sig som i kombination. I projektet kommer dessutom simuleringsförsök att utföras för att fastställa POD vid användning av röntgenteknik. Inledningsvis bearbetas den information som finns om de verkliga defekterna med avseende på viktiga parametrar som orientering, storlek, formfaktorer spaltbredd med mera. Nästa steg är att statistiskt bestämma inom vilka gränser dessa parametrar varierar samt slumpmässigt generera defekter inom detta parameterfönster. Fördelen är att i princip ett obegränsat antal relevanta defekter kan genereras och avbildas i simuleringsprogrammet, och därmed att det statistiska underlaget för analysen kan ökas väsentligt. Ovanstående, som beskrivs schematiskt i figur 6-23, sker i två parallella spår som behandlar förslutningssvetsar utförda med såväl elektronstrålesvetsning som friction stir welding.

Projektet vid BAM beräknas avslutas under 2005 och slutrapporteras 2006. Delresultat från studien kommer att avrapporteras under denna period.

Under första halvåret 2005 avser vi att avrapportera erfarenheter och uppnådda resultat inom oförstörande provning.

Efter valet av svetsmetod avser vi att starta en förstudie avseende kravbilden för och möjlig nytta av ultraljudsmodellering. Förstudien kommer enligt planerna att starta under andra halvåret 2005.



Figur 6-23. Flödesschema (projekt NDT Reliability vid BAM).

7 Kapsel – kvalificering

Innan inkapslingsanläggningen och kapselfabriken tas i drift ska kvalificering av metoder för tillverkning, svetsning och oförstörande provning av kapslar genomföras.

Kvalificeringen av processerna är dokumenterade undersökningar, som säkerställer att de producerade kapslarna uppfyller det slutliga kravet att kapslarna är en tillförlitlig barriär i djupförvaret. De specificerade kraven för varje delprocess ska utarbetas och kvalificeringen ska ske mot dessa krav. Ett program för kvalificering ska tas fram och redovisas som underlag till tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen.

Arbetet med kvalificering kan delas upp i kvalificering av metoder för tillverkning och svetsning samt i kvalificering av metoder för oförstörande provning. Detta beskrivs närmare i avsnitt 7.1 och 7.2.

7.1 Kvalificering av metoder för tillverkning och svetsning

Som framgår av kapitel 6 arbetar SKB parallellt med utveckling av två svetsmetoder vid Kapsellaboratoriet: friction stir welding och elektronstrålesvetsning. Inför ansökan om att få uppföra inkapslingsanläggningen måste metoderna för förslutning och oförstörande provning bestämmas.

Valet av referenssvetsmetod kan ses som ett första steg i en kvalificering. Inför detta har ett antal kriterier tagits fram. Metoderna måste uppfylla dessa kriterier och jämföras enligt dem. Bland kriterierna kan nämnas:

- **Tillförlitlighet.** Risken för att det ska uppstå fel som överstiger acceptanskriterierna för förslutningssvetsarna ska vara låg. Svetsprocessen ska gå att kontrollera med styrbara parametrar.
- **Robusthet.** Sannolikheten för störningar, som påverkar svetskvaliteten, ska vara liten. Små oförutsedda eller normala förändringar i svetsparametrar, utrustning eller omgivande miljö ska inte påverka svetskvaliteten. Processfönstret, det vill säga de intervall inom vilka svetsparametrarna måste ligga för att man ska få en tillräckligt hög kvalitet på svetsen, ska vara stort i jämförelse med toleranserna hos parametrarna i processen.
- **Repeterbarhet.** Samma svetsparametrar och omgivande miljö ska ge samma svetskvalitet. Förändringar i svetskvalitet ska kunna härledas till förändringar i parametrar och omgivande miljö. Efter service och underhåll av svetsutrustningen ska samma svetsparametrar ge bibehållen svetskvalitet.
- **Provningsbarhet.** De diskontinuiteter som kan uppstå i processen ska vara påvisbara med erforderlig sannolikhet med hjälp av oförstörande provning. Formerna för denna utvärdering beskrivs närmare i avsnitt 7.2.

SKB:s uppgift är nu att slutföra utvecklingen av svetsprocesserna och svetsutrustningarna, samt att verifiera att bland annat ovanstående kriterier är uppfyllda. En stor del av det grundläggande arbetet med att utveckla svetsprocesser och svetsutrustning har redan genomförts. Vad som återstår är att bättre kvantifiera vissa av de viktiga variablerna, hur de påverkar varandra samt att fastställa de optimala inställningarna för stabil drift. Vidare måste SKB demonstrera att det går att svetsa med tillräckligt hög kvalitet under förhållanden som liknar den seriemässiga förslutningen i inkapslingsanläggningen.

För de olika tillverkningsprocesserna har SKB utarbetat ett kvalitetssystem för kapsel-tillverkning. Detta innehåller bland annat rutiner som beskriver hur kvalificering av såväl leverantörer som tillverkningsprocesser ska gå till.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Valet av metoder för att försluta och prova kapseln påverkar utformningen av inkapslingsanläggningen och bör alltså ha gjorts vid tiden för ansökan om tillstånd att få uppföra anläggningen. Vid den tidpunkten kommer även ett program för kvalificering av metoderna att finnas. Kvalificering av metoderna görs i ett senare skede inför inkapslingen av det använda bränslet.

SKI:s synpunkter på kvalificering av förslutningsmetoden är i stort sett desamma som synpunkterna för oförstörande provning (enligt nedan).

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

För att fastställa tillförlitlighet, robusthet och repeterbarhet hos svetsmetoderna för förslutning har en strategi tagits fram. Strategin bygger på statistiska metoder. Sådana har använts med stor framgång sedan 1950-talet för att utveckla och utforma industriella processer. Experiment baserade på ett statistiskt synsätt används ofta för att modellera och optimera ett systems respons, men fokus kan även ligga på att studera systemets stabilitet (variansen hos responsen). Valet av en lämplig experimentplan för respektive svetsmetod har skett utifrån antalet involverade faktorer och utifrån vilken detaljeringsgrad som den studerade domänen ska beskrivas med. En utförligare beskrivning av programmet har publicerats /7-1/ och återfinns i kapitel 6 under respektive svetsmetod.

Program

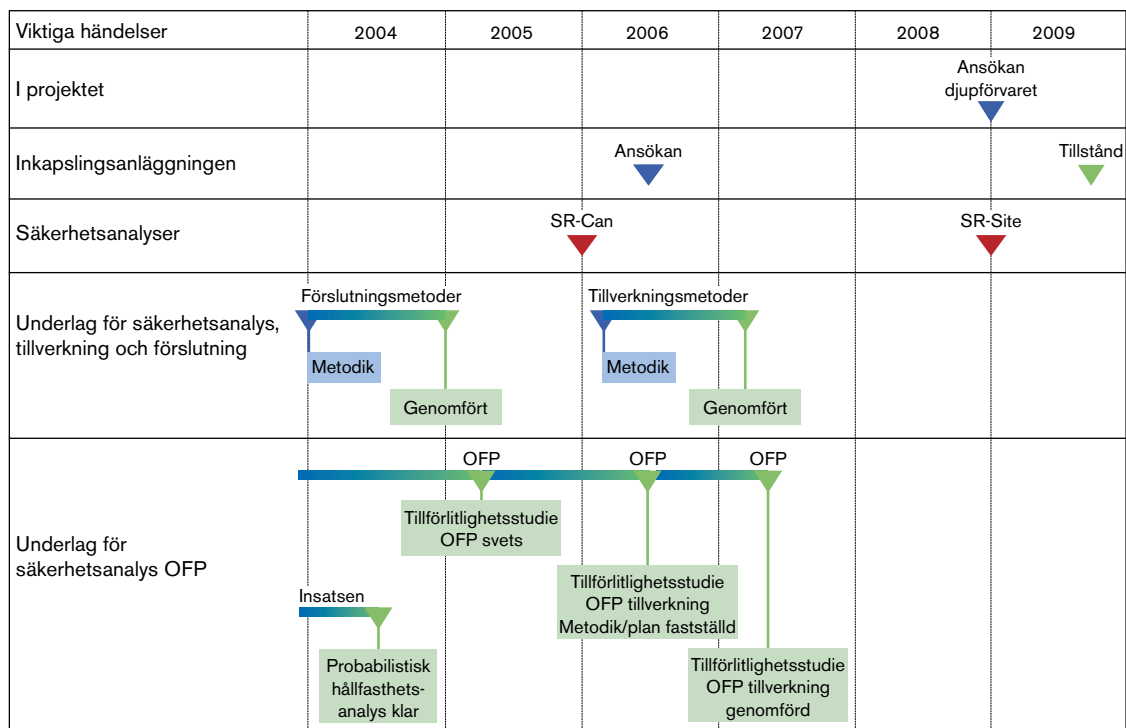
Svetsningar och provning av svetsar kommer enligt planerna att genomföras under 2004. Utvärdering av resultaten sker under 2005. Resultaten är viktiga såväl inför valet av svetsmetod som för att få indata avseende inkapslingsprocessen till djupförvarets säkerhetsanalys.

SKB planerar att genomföra ett projekt under 2004 med syfte att studera förutsättningarna och de övergripande formerna för kvalificering av tillverknings- och svetsmetoder. Vid tidpunkten för ansökan har SKB för avsikt att presentera ett program inom detta område. SKB kommer att hålla SKI informerat under programmets framtagande.

En milstolpe, som redan nu kan definieras, är att fram till mitten av 2006 ta fram ett program för att bestämma tillverkningsmetodernas tillförlitlighet. Programmet ska genomföras inför den planerade säkerhetsanalysen för djupförvaret, SR-Site.

Kopplingen mellan kvalificering och säkerhetsanalys är viktig, eftersom kvalificeringsmålen både för tillverknings- och svetsprocesser samt oförstörande provning ska sättas så att säkerheten i djupförvaret garanteras. Figur 7-1 beskriver tidsplanen för att ta fram de olika underlagen för säkerhetsanalyserna. Inför SR-Can beräknas även data från den probabilistiska säkerhetsanalysen, se avsnitt 14.2, att vara tillgängliga.

Som framgår av planen kommer arbetet under perioden 2005–2008 att vara inriktat mot att ta fram data avseende tillverkningsprocessernas tillförlitlighet inför SR-Site.



Figur 7-1. Tidsplaner för att ta fram underlag för de olika säkerhetsanalyserna.

7.2 Kvalificering av metoder för oförstörande provning

Kapslarna med det använda kärnbränslet kommer att genomgå oförstörande provning med bland annat röntgen och ultraljud innan de deponeras. Liksom tillverknings- och förslutningsmetoderna kommer även metoderna för oförstörande provning, som ska användas, att genomgå kvalificering.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I kvalificeringen kan två milstolpar urskiljas. Den första inträffar då SKB planerar att ansöka om tillstånd att få uppföra en inkapslingsanläggning. I detta skede är kvalificeringen inriktad mot så kallade tekniska motiveringar. Vad tekniska motiveringar innebär framgår av Eniq (European Network for Inspection Qualification) Recommended Practice 2 /7-2/. SKB avser att tillämpa denna rekommendation för att dokumentera metoderna för oförstörande provning. Den andra milstolpen infaller när inkapslingsanläggningen tas i drift. Då avser SKB att kvalificera metoderna för oförstörande provning utgående från Eniq Recommended Practice 4 /7-3/.

SKI uppmanar SKB att tydligare beskriva vem som ska utföra kvalificeringen av oförstörande provning och hur infrastrukturen för kvalificeringar ska se ut. SKI anser att SKB underskattar tidsåtgången för kvalificering och att resultatet från denna, i ett sent skede, kan påverka utformningen av inkapslingsanläggningen till exempel om någon metod för oförstörande provning inte ger önskat resultat.

Vidare påpekar myndigheten att den kvalificeringsmetodik med preciseringar som beskrivs i Eniqs dokument, måste anpassas för oförstörande provning av kapslar eftersom den egentligen är utvecklad för återkommande kontroll av mekaniska anordningar i kärnkraftverk. Utvecklingen av metodiken ska ske mot klart definierade mål för kvalificeringen. En nödvändig förutsättning för kvalificering är kännedom om möjliga defekter liksom acceptanskriterier. Arbetet med acceptanskriterier måste ges hög prioritet.

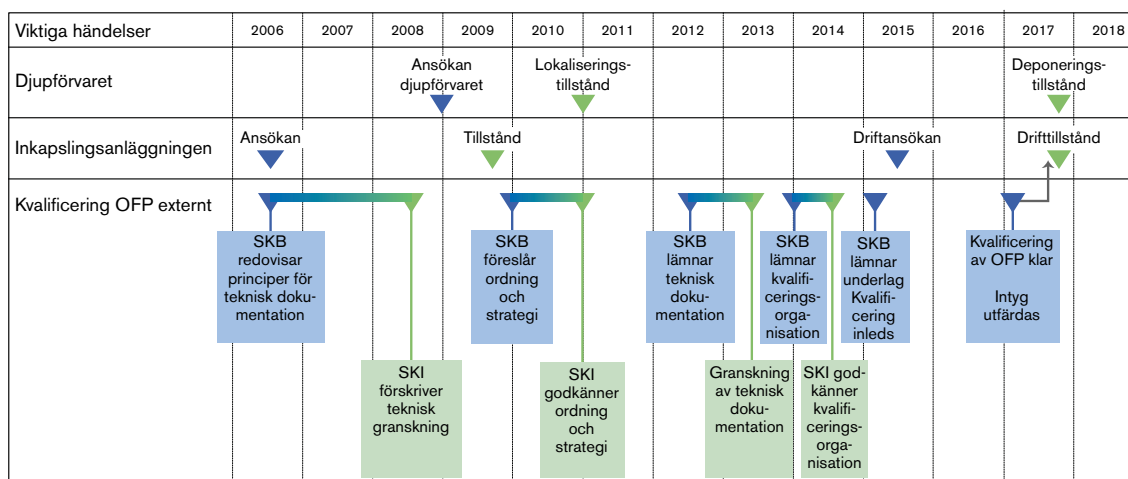
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

SKB instämmer i myndigheternas synpunkter att kvalificeringsprocessen måste anpassas till KBS-3. SKB har en pågående dialog med SKI angående de övergripande formerna för kvalificering och den långsiktiga tidsplanen för denna. Parallellt för SKB en dialog med det oberoende kvalificeringsorganet SQC Kvalificeringscentrum AB (SQC) kring utvecklingen av ett kvalificeringsprogram som är anpassat till KBS-3. Inför de kommande ansökningarna för inkapslingsanläggningen och djupförvaret arbetar SKB med en plan för kvalificering av metoder för oförstörande provning. I de diskussioner som förs med SKI har successivt framkommit ett behov av att förtydliga de olika stegen i kvalificeringsprogrammet, logiken i den underliggande dokumentationen samt kopplingar till säkerhetsanalyserna inför ansökan om att få bygga inkapslingsanläggningen (SR-Can) och djupförvaret (SR-Site).

Den övergripande tidsplanen, som SKB arbetar med för att genomföra kvalificering av oförstörande provning, framgår av figur 7-2.

”Principer för teknisk dokumentation”, redovisas enligt planen vid ansökan. Med detta avses sådana underlag, som kan anses vara relevanta för att ställa upp kraven för oförstörande provning. Arbetet med att definiera relevanta tekniska underlag pågår. Syftet med milstolpen är att i överskådlig form sammanställa underlagen och vid behov redovisa handlingsplaner för att se till att sammanställningen är komplett då den ska redovisas i sin slutliga form i mitten av 2011. En lämplig struktur för dessa underlag är:

- **Konstruktionsförutsättningar.** Analys och utveckling av härledda krav från de övergripande konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret. Analysen resulterar i detaljerade konstruktionsförutsättningar för kapseln och underlag för val av material till kapseln.
- **Belastningsunderlag.** De olika belastningarna på kapseln som hanteringslaster, trycklaster i djupförvaret samt de olika kemiska processer som i olika tidsperspektiv påverkar kapseln.
- **Hållfasthetsanalyser.** Fastställande av materialegenskaperna hos kapseln, hållfasthetsberäkningar och förutsättningarna för dessa. Dimensionering av kapseln.
- **Tillverkning, förslutning och kontroll.** Tillverknings- och svetsprocesser samt beskrivning av de defekter som kan uppstå vid dessa. De inspektionsprocesser som avses tillämpas samt acceptanskriterier. Kvalificeringskrav och detekteringsmål för inspektionsprocesserna.



Figur 7-2. Översiktlig tidsplan för att genomföra kvalificering av oförstörande provning.

En annan viktig milstolpe inträffar i slutet av 2009, då SKB föreslår kvalificeringsordningen. SKB:s huvudlinje är att ett kvalificeringsorgan ska genomföra kvalificeringarna. För att förbereda denna punkt har SKB initierat ett arbete tillsammans med SQC för att anpassa den rådande kvalificeringsprocessen till ett relevant kvalificeringsprogram för tillverknings- och inkapslingsprocesserna. En viktig förutsättning för att programmet ska kunna genomföras är att kvalificeringsorganet godkänns av SKI. Kvalificeringsorganet måste därför bygga upp kompetens och erforderliga instruktioner. SQC har fått i uppdrag att ta fram program för erforderliga förberedelser.

SKB instämmer även i myndigheternas synpunkt att det är viktigt att säkerställa att tillförlitligheten hos metoderna för oförstörande provning uppfyller kraven i ett tidigt skede, för att undvika komplikationer i inkapslingsanläggningen. Vi har därför initierat ett program för att bestämma dessa. I programmets första del utvärderas de processer för oförstörande provning som utvecklats vid Kapsellaboratoriet och som enligt planerna ska användas för kontroll av förslutningsprocessen. Programmet genomförs i samarbete med extern expertis vid BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung i Berlin, och redovisas i avsnitt 6.4.

Program

En rapport, som beskriver programmet för kvalificering av metoder för oförstörande provning, ska tas fram. Utifrån en övergripande struktur, se figur 7-2, definieras milstolparna i projektet och erforderliga delaktiviteter beskrivs. Rapporten kommer enligt planerna att kunna färdigställas under 2004. En statusrapport lämnas vid tidpunkten för ansökan.

Tillförlitlighetsstudien för oförstörande provning av förslutningssvetsen kommer enligt planerna att slutföras under 2005. Rapporter som beskriver utförande, resultat och slutsatser kommer att publiceras. En sammanfattande rapport kommer att färdigställas senast vid tidpunkten för ansökan.

8 Kapsel – inkapsling

Inkapslingsanläggningens utformning beror på var den lokaliseras. SKB:s huvudalternativ är att bygga inkapslingsanläggningen i anslutning till Clab. Arbetet med att projektera en sådan anläggning påbörjades 1993. Anläggningen har sedan dess vidareutvecklats och förändrats. SKB har också studerat möjligheten att bygga en inkapslingsanläggning i anslutning till djupförvaret i Forsmark.

I detta kapitel behandlas en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab i avsnitt 8.1 och en inkapslingsanläggning i Forsmark i avsnitt 8.2. Avsnitt 8.3 och 8.4 tar upp de insatser av fysiskt skydd respektive safeguards som kommer att krävas.

8.1 Inkapslingsanläggning vid Clab

De övergripande produktionskraven på inkapslingsanläggningen är att den ska ha en kapacitet om en kapsel per dag, en livslängd av minst 60 år samt att alla förekommande typer av använt bränsle som förvaras i Clab ska kunna hanteras och kapslas in. För att skydda personal och personer i omgivningen ställs höga krav på säkerheten vid drift av anläggningen. De uppställda kraven gäller bland annat strålskydd och brandskydd. Det använda bränslet ska alltid kunna hanteras utan risk för kriticitet.

Under tiden då anläggningen projekteras och uppförs hanteras den fristående från Clab med en egen preliminär säkerhetsredovisning. Därefter kommer säkerhetsredovisningen att integreras med redovisningen av Clab.

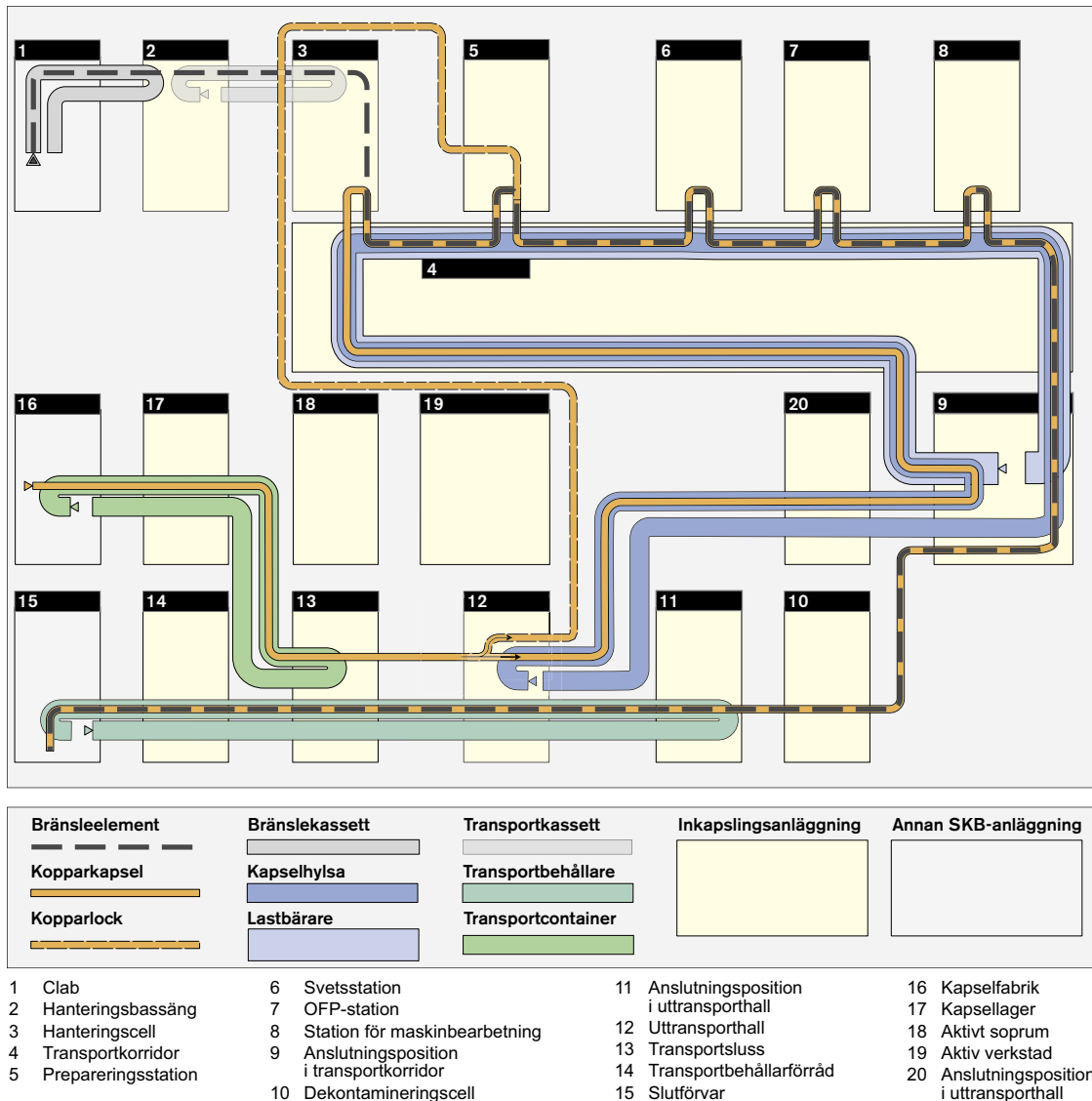
Olika lokaliseringalternativ har tidigare jämförts och redovisats i /8-1/. Fördelarna med en lokalisering i direkt anslutning till Clab är flera. Bland annat kan den erfarenhet av bränslehantering, som finns på Clab, tas tillvara. Flera av de befintliga systemen och anläggningsdelarna i Clab kan också utnyttjas för båda anläggningarna.

8.1.1 Anläggningen

Förutom bränsle från de i dag energiproducerande kärnkraftanläggningarna förvaras det en del udda bränsletyper i Clabs förvaringsbassänger. Avsikten är att även detta bränsle ska kunna kapslas in i kopparkapslarna, utan att kapselkonstruktionen ska behöva ändras. På samma sätt som man använder distansstycken i transportbehållarna vid transporter till Clab, kan man anpassa utrymmet i insatsernas kanaler till samtliga bränsletyper med hjälp av distansstycken i kapslarna.

Skadat bränsle transporteras till Clab i speciella skyddsboxar. Efter ankomsten till Clab har det transporterade skadade bränslet hittills lyfts ut ur skyddsboxarna och förvarats på samma sätt som övrigt bränsle, det vill säga i bränslekassetter i förvaringsbassängerna. I framtiden kan skadat bränsle komma att förvaras i Clab i skyddsboxar. Före inkapsling av det skadade bränslet måste dock även detta bränsle lyftas ut ur skyddsboxarna för att kunna placeras i kopparkapslarna. De erfarenheter som finns från transport av skadat bränsle samt hantering och förvaring av det i Clab tyder på att ingen ytterligare degenerering av bränslet sker under förvaringen.

En begränsande faktor för bränsleinnehållet i en kopparkapsel är kapselhöljets ytemperatur i djupförvaret. Vid utformningen av inkapslingsanläggningen antas den maximalt tillåtna effekten i varje kapsel vara cirka 1,7 kW. Eftersom utbränning och kyltider varierar för det använda bränslet innebär detta att innehållet i varje enskild kopparkapsel måste planeras noggrant för att maximalt kunna utnyttja kapslarna. Mot slutet av inkapslingsperioden kan det ändå bli så att man väljer att inte helt fylla kapslarna i stället för att invänta avklingningen.

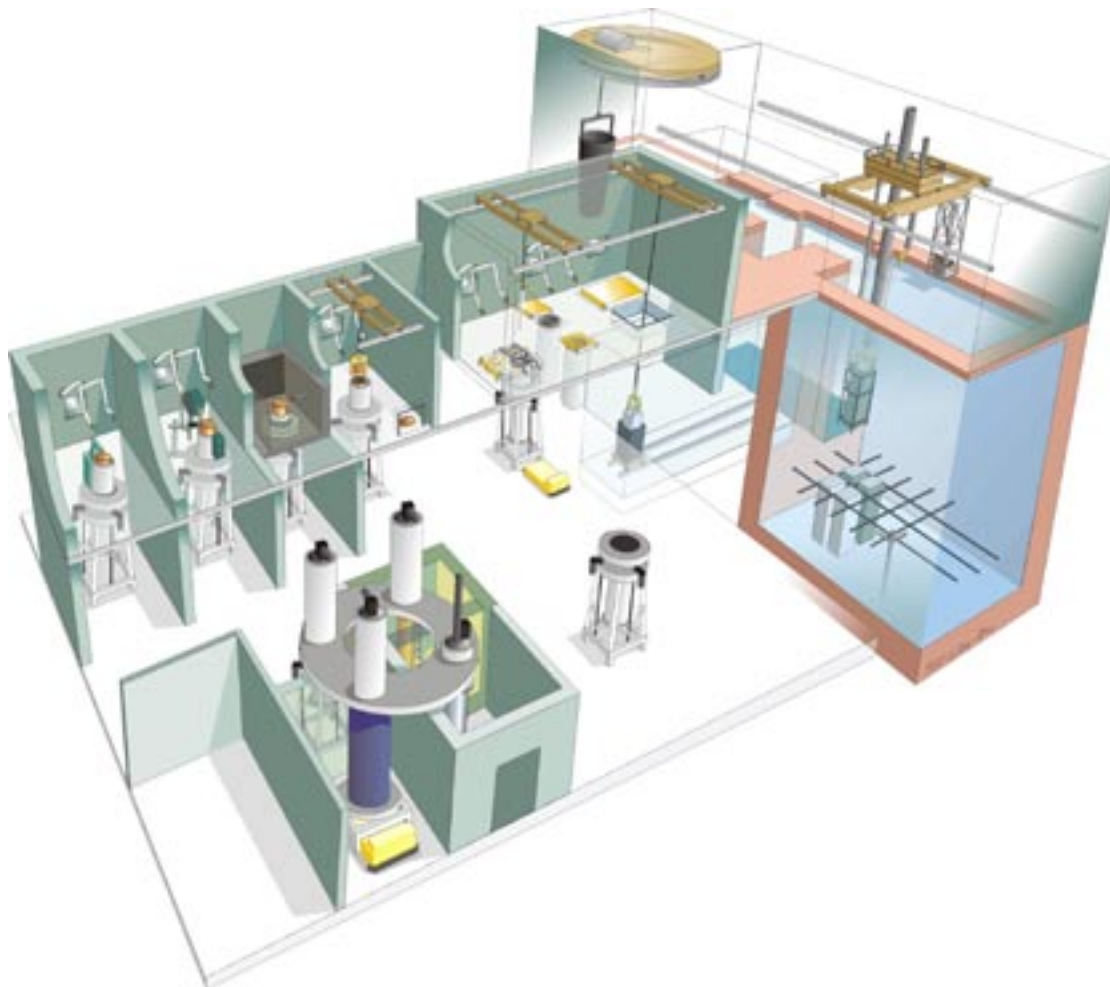


Figur 8-1. Huvudprocessschema för inkapslingsanläggningen.

I texten nedan hänvisas till positionerna 1 till 13 i figur 8-1. En skiss över inkapslingsanläggningen finns i figur 8-2.

Bränsleelementen, som förvaras i bränslekassetter, förflyttas till inkapslingsanläggningen med hjälp av den befintliga bränslehissen i Clab (1). Bränslekassetten placeras i bränslehissens vattenfyllda hisskorg och lyfts upp från förvaringsdelen. Kassetten förs vidare till inkapslingsanläggningens bassänger som är placerade i direkt anslutning till bränslehissen.

I hanteringsbassängen (2) flyttas bränsleelementen över från förvaringskassetten till en transportkasset, som är avsedd för den interna bränslehanteringen i inkapslingsanläggningen. Omflyttningen görs av flera skäl. Förvaringskassetterna innehåller fler element än det ryms i en kapsel, medan transportkassetten har lika många positioner som kapseln. Vidare finns kravet att den sammanlagda resteffekten i en kapsel inte får överstiga 1,7 kW. En strävan är att få en jämn fördelning av resteffekten i kapslarna. Eftersom safeguardssystemet i Clab innehåller all nödvändig information om varje förvarat bränsleelements position, historik, ursprung och fysiska data, kan urvalet till varje kapsel göras i god tid. I samband med överflyttningen till transportkassetter kontrolleras varje elements identitet (märkning) och resteffekt. Den verifierande mätningen av resteffekt utförs med en utrustning för gammascanning. Varje bränsleförflyttning styrs av en driftorder på samma sätt som i Clab i dag.



Figur 8-2. Arbetsstationer i inkapslingsanläggningen.

Transportkassetten lyfts upp ur inkapslingsanläggningens bassäng in i den strålskärmade hanteringscellen (3) med hjälp av den fjärrstyrda hanteringsmaskinen i cellen. Kassetten dräneras på vatten och placeras sedan i en av de två positioner där bränslet torkas. När bränslet torkats lyfts elementen, ett i taget, över till en kapsel. Kapseln med tillhörande kapselhylsa står i en strålskärmad lastbärare, som är dockad underifrån till en annan del av cellen. Under ilastningen av bränsle är kapseln försedd med ett skydd, så att kopparmantelns fogyta inte riskerar att skadas. En skada skulle kunna leda till problem vid svetsningen av kopparlocket. När kapseln är fylld skruvas stållocket fast på gjutjärnsinsatsen. Den tomma transportkassetten förs tillbaka till hanteringsbassängen. Hanteringen sker fjärrstyrt från en arbetsplats utanför den strålskärmade cellen.

Anslutningen mellan kapseln och hanteringscellen är tät för att förhindra att kapselns utsida kontamineras och för att hindra luft från att tränga ut från cellen och sprida radioaktiva ämnen i övriga delar av anläggningen.

Transportkorridoren (4) utgör förbindelseutrymmet mellan (och under) de olika cellerna där kapslar hanteras. Kapseln och kapselhylsan förflyttas stående i en lastbärare med en luftkudde-truck. Trucken består av en pall, som hålls upp av ett antal luftkuddar. Luftkuddarna förses med luft via en slang och ström fås från batterier ombord på trucken. Lastbäraren består av en ställning försedd med strålskärm. Inuti strålskärmen ryms kapselhylsan i vilken kapseln är placerad. Strålskärmen har två teleskopiska delar. Den övre är fast monterad och försedd med en rörlig strålskärmade lucka upptill. Den nedre strålskärmen kan röra sig vertikalt så att kapseln kan höjas och sänkas. I botten finns ett vridbord som kan rotera kapseln, vilket krävs

vid elektronstrålesvetsning, maskinbearbetning och oförstörande provning. I prepareringsstationen (5) förbereds kapseln för svetsning. Kapseln dockas underifrån på liknande sätt som vid hanteringscellen. (Gäller även de följande arbetsstationerna).

Atmosfärsbyte i kapseln utförs via en genomföring i stållocket, luften evakueras och kapseln fylls med argon. Därefter täthetsprovas stållocket. I cellen kontrolleras och, vid behov, rengörs även kapselns fogyta varefter kopparlocket lyfts ner på kapseln.

Elektronstrålesvetsning: Vid svetsstationen (6) dockas kopparkapseln till en vakuumkammare som finns inne i stationen. Efter dockningen lyfts kopparlocket upp och kammaren vakuum-pumpas liksom utrymmet mellan insatsen och kopparhöljet. Därefter läggs kopparlocket återigen på plats och kopparkapseln försluts med elektronstrålesvetsning. Vid svetsningen roteras kapseln runt sin axel på vridbordet i lastbäraren.

Friction stir welding: Vid svetsstationen (6) dockas kapseln underifrån på liknande sätt som vid hanteringscellen. Kopparkapseln försluts med friction stir welding. Vid svetsningen håller kraftiga plattor i kapseln medan svetshuvudet roterar runt kapseln.

I stationen för oförstörande provning (7) kontrolleras svetsfogen med avseende på svetsens kvalitet. De metoder som används är röntgen- och ultraljudsprovning. Beroende på vilka de slutliga kvalitetskraven på svetsarna kommer att bli, kan även induktiv provning bli aktuell.

Om svetsen blir underkänd vid den oförstörande provningen, men innehåller defekter som går att reparera, förs kapseln tillbaka till svetsstationen där den repareras. Därefter kontrolleras svetsens kvalitet på nytt. I de fall då svetsen inte går att reparera ställs lastbäraren med den underkända kapseln åt sidan, så att den normala produktionen inte hindras. Vid lämpligt tillfälle transporteras kapseln tillbaka till stationen för maskinbearbetning där kopparlocket skärs upp med hjälp av fräsmaskinen. Kopparlocket lyfts sedan av och därefter transporteras kapseln till hanteringscellen. Där lastas bränslet över i en tom transportkassett, som står i en av torkpositionerna. Kapseln dekontamineras i aktiva verkstaden (19) och kopparhöljet skickas till återvinning. Insatsen återanvänds i en ny kapsel. De urlastade bränsleelementen i hanteringscellen lastas över i en ny kapsel.

Uppfyller kapseln kvalitetskraven transporteras den vidare till maskinbearbetningsstationen (8) där svetsfogen och dess närområde bearbetas, så att kapseln får en jämn yta i svetsområdet i enlighet med kapselns övriga form- och dimensionskrav. I anslutningspositionen i transportkorridoren (9) lyfts kapseln ur kapselhylsan, varefter kapselhylsan lyfts ut ur lastbäraren. I dekontamineringscellen (10) tas strykprover på kapseln för att kontrollera att den är fri från ytkontaminering. Vid behov av dekontaminering används högtrycksvatten, varpå nya strykprover tas. Även ytdosraten mäts innan kapseln lämnar cellen.

I anslutningspositionen i uttransporthallen (11) lastas kapseln i transportbehållaren, varefter behållarens lock monteras. Via uttransporthallen (12) flyttas den till slutna kapseltransportbehållaren till transportslussen (13) där den lyfts ner på en lastbärare och förankras liggande. I transportslussen kontrolleras behållaren, varefter den transporteras ut med hjälp av ett terminalfordon. Om inte transporten till djupförvarsanläggningen påbörjas direkt placeras behållaren i ett förråd i väntan på transport. Förrådet utgör även tillfällig uppställningsplats för tomma kapseltransportbehållare.

De fyllda kapseltransportbehållarna transporteras till och tas emot vid djupförvarsanläggningen. Kapslarna lastas ur varefter de tomma behållarna transporteras tillbaka till inkapslingsanläggningen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I granskningskommentarerna till Fud 2001 påpekade SKI vikten av flexibilitet i inkapslingsanläggningen, eftersom många moment i processen inte fått sin slutliga utformning. Vidare påpekade SKI att det är viktigt att tillvarata erfarenheter från Kapsellaboratoriet vid utformning av anläggningen samt att en utförligare beskrivning av hur skadat bränsle, bränslerester, Mox etc

påverkar hantering och utformning av anläggningen. Påverkan på inkapslingsanläggningen vid ett eventuellt byte till horisontell deponering ska också belysas.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Erfarenhetsåterföring från verksamheten vid Kapsellaboratoriet till projekteringen av inkapslingsanläggningen sker kontinuerligt, bland annat genom att personal från Kapsellaboratoriet ingår i inkapslingsprojektets organisation.

Under 2003 installerades och driftsattes den nya svetsutrustningen för friction stir welding i Kapsellaboratoriet. Utrustningen utgör en alternativ svetsmetod till elektronstrålesvetsning. Erfarenheterna från utvecklingen av svetsmetoderna ger viktig information inför projekteringen av inkapslingsanläggningen. Detta gäller även utvecklingen av metoderna för oförstörande provning samt övrig verksamhet vid Kapsellaboratoriet.

Atmosfärsbytet i kapselns gjutna insats behöver inte göras under förutsättning att en specifik mängd vatten kan accepteras i kapseln. Även då bränslet har genomgått torkningsprocessen skulle det teoretiskt sett kunna finnas vatten kvar i någon skadad bränslestav. I nuläget går det inte att bestämma hur många skadade bränslestavar, som skulle kunna hamna i samma kapsel. Därigenom går det inte heller att fastställa hur mycket vatten, som därmed skulle finnas i kapseln. Resultatet av detta är att anläggningen i nuläget projekteras för atmosfärsbyte i kapselinsatsen. Atmosfärsbytet leder till en acceptabel kemi inne i kapseln, men innebär extra moment i inkapslingsprocessen.

Inkapslingsanläggningen projekteras enbart för inkapsling av använt bränsle. Det kommer inte att vid en senare tidpunkt vara möjligt att lägga till utrustning för hantering av låg- och medelaktivt avfall inom anläggningen.

Ett eventuellt byte till horisontell deponering i djupförvaret kommer inte, enligt nuvarande planer, att påverka utformningen av inkapslingsanläggningen eftersom prepareringen av kapseln före deponering är tänkt att ske i djupförvarsanläggningen.

Under 2003 installerades den nya resteffektutrustningen på Clab. Denna är avsedd för noggrann bestämning av bränslets resteffekt. Utrustningen består av en kalorimeter, kompletterad med gammaprober för att mäta de effektförluster i kalorimetern som orsakas av gammastrålning, som inte har absorberats. Ju noggrannare bestämningen av resteffekten kan ske, desto bättre blir djupförvarets utformning, eftersom kapslarnas ytemperatur styr hur nära varandra de kan placeras. Hög resteffekt, alternativt stor osäkerhet om resteffektens storlek, innebär att avståndet mellan kapslarna måste vara större. Detta leder i sin tur till att djupförvarets undermarksdel blir större.

Program

Resteffektuppmätningar med den nya mätutrustningen kommer att genomföras i kampanjer. Den första mätkampanjen på Clab-bränsle har inletts. En särskild databas har etablerats för lagring och hantering av de stora mängderna mätdata. Uppskattningsvis kommer 15–20 bränsleelement på Clab att mätas varje år. Parallellt med de kalorimetriska mätningarna görs gammamätningar på samma bränsleelement. Avsikten är att den beräknade resteffekten ska kunna verifieras med enbart gammamätning vid tiden för inkapsling, eftersom den kalorimetriska mätningen är en tidskrävande och omständlig process.

Resultatet från varje kampanj kommer att utvärderas noggrant, både i nära samarbete med svenska företag och med Oak Ridge National Laboratory (ORNL) i USA. SKB har sedan november 2000 ett samarbetsavtal inom området med UT-Battelle som driver ORNL.

En handlingsplan kommer att utarbetas i syfte att beskriva vad det skulle innebära för inkapslingsverksamheten om den verifierande mätningen av bränsle, som görs direkt före inkapslingen, skulle visa på stora avvikelser i relation till de uppgifter som kärnkraftverken

lämnade i samband med att bränslet överfördes till Clab. En stor del av inkapslingsverksamheten kommer att pågå långt efter att kärnkraften har lagts ner, vilket bör noteras.

I kärnkraftsföretagens planer finns förändringar som kan komma att påverka bränslets geometri och källtermer. Detta kan komma att påverka anläggningar och transportsystem. En utredning i syfte att ta fram en långsiktig strategi för SKB har påbörjats.

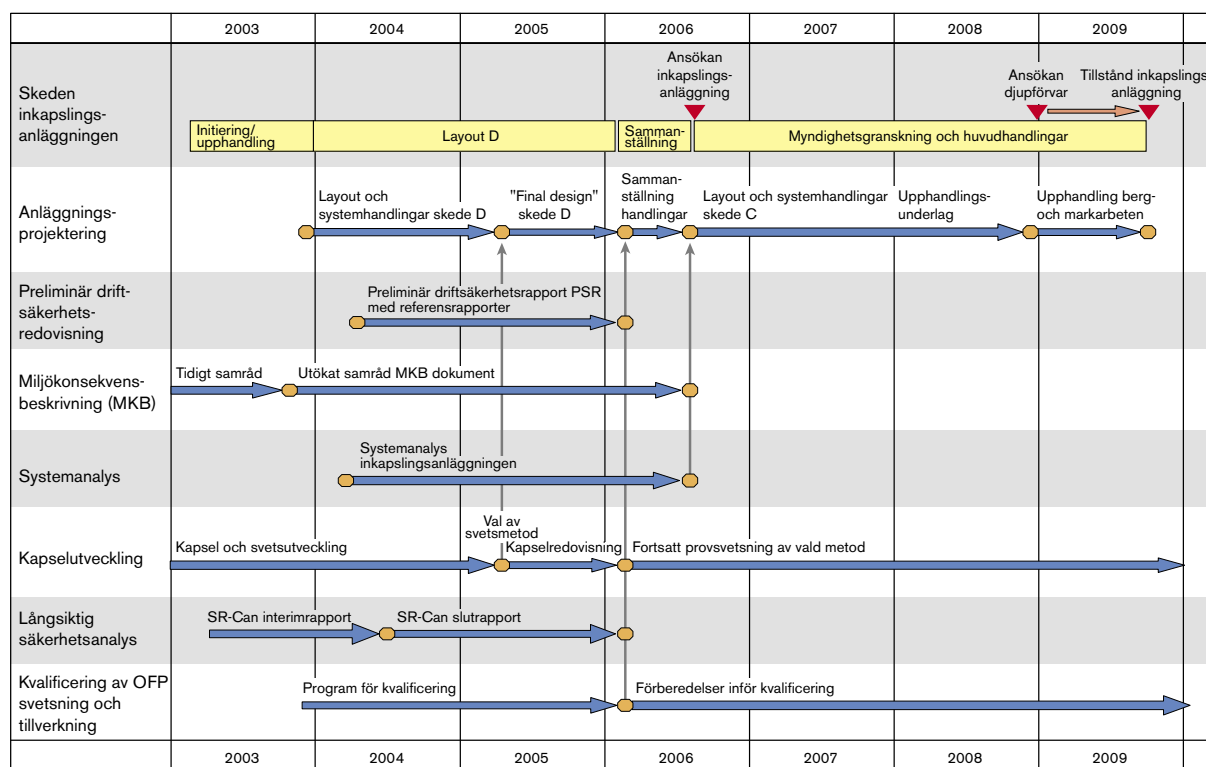
8.1.2 Projektering och ansökan

Projektering av inkapslingsanläggningen sker i steg. Det pågående projekteringssteget motsvarar den detaljeringsnivå som krävs i en ansökan om att få uppföra en anläggning. Projektering av en inkapslingsanläggning vid Clab har tidigare gjorts till detta skede /8-2/. Den pågående projekteringen är alltså en revidering där erfarenheter från Kapsellaboratoriet, förändringar i regelverket och teknisk utveckling arbetas in i konstruktionen. Projekteringen sker i nära samarbete med SKB:s finska motsvarighet Posiva.

För att utforma anläggningen har SKB startat ett projekt och kontrakterat en projektör för anläggning och process. Från projekteringen fås underlag till systemdelen i den preliminära säkerhetsrapporten samt vissa referenser till rapportens allmänna del. Arbetet med att ta fram den allmänna delen drivs separat. Allt säkerhetsrelaterat underlag kommer även att granskas fristående av en organisation med erfarenheter från liknande kärntekniska uppdrag.

Parallellt med projekteringen av inkapslingsanläggningen pågår processen med att ta fram en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) där samråd med berörda är en viktig del av detta arbete.

Till ansökan om att få uppföra inkapslingsanläggningen kommer, förutom en preliminär säkerhetsrapport och en miljökonsekvensbeskrivning, även en säkerhetsanalys av den långsiktiga säkerheten i djupförvaret och en systemanalys av KBS-3 att redovisas. Detta framgår av figur 8-3.



Figur 8-3. Tidsplan för inkapslingsanläggningen.

8.2 Inkapslingsanläggning vid djupförvaret

SKB har tidigare genomfört en förstudie av en inkapslingsanläggning fristående från Clab /8-3/. Anläggningen förutsattes då vara placerad i närheten av djupförvarsanläggningens ovanmarksdel. En förutsättning för att lokalisera inkapslingsanläggningen till Forsmark är givetvis att även djupförvaret lokaliseras dit.

Den huvudsakliga tekniska skillnaden mellan den projekterade inkapslingsanläggningen vid Clab och en fristående anläggning vid djupförvaret är hur bränslet hanteras och förbereds innan själva inkapslingen. Bränslemottagningen vid inkapslingsanläggningen vid djupförvaret sker torrt, det vill säga inga bassänger används. Bränslemottagningens tekniska lösning har granskats av två oberoende internationella företag med erfarenhet av torr hantering av bränsleelement.

Den befintliga Clab-anläggningen används för verifierande mätningar, sortering samt torkning av bränslet innan det transporteras till inkapslingsanläggningen. Detta innebär att Clab till vissa delar måste byggas om och kompletteras med ny utrustning.

De tekniska förutsättningarna för att kunna uppföra en inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret är goda. Nedan följer en kort processbeskrivning för denna placering.

De bränsleelement som ska kapslas in förflyttas från förvaringsbassängerna via bränslehissen in i Clabs komponentbassäng där en verifierande gammamätning kan genomföras. Respektive bränsleelement får passera ett antal detektorer som mäter av bränslet. Bränslet placeras därefter i en kassett, som när den blivit full flyttas till servicebassängen. Härifrån lyfts bränslet över till en transportbehållare.

När behållaren fyllts monteras locket och behållaren lyfts över till en nedkylningscell. Vattnet dräneras ut och ett torksystem ansluts till behållaren. Efter torkning kontrolleras torrheten i transportbehållaren samt dess renhet på ytan. Slutligen monteras stötdämpare varefter behållaren transporteras till inkapslingsanläggningen vid djupförvarsanläggningen.

Bränslet anländer sorterat och torrt till inkapslingsanläggningen, vilket är en förutsättning eftersom det inte finns några bassänger i anläggningen. Fyra bränsletransportbehållare tas emot varje vecka. Transportbehållarens stötdämpare demonteras och en bottenadapter skruvas fast. Med huvudtraversen förflyttas transportbehållaren antingen till uppställningsplatsen för transportbehållare eller till någon av prepareringscellerna i hanteringshallen.

I prepareringscellen ansluts ett ventilationssystem för att ventilera behållaren och detektera eventuellt skadat bränsle. Ett undertryck mot omgivningen upprätthålls för att undvika att radioaktiva ämnen sprids med luften i anläggningen. Därefter demonteras ytterlocket. När förberedelserna är klara förflyttas behållaren med huvudtraversen till en rälsbunden vagn.

Vagnen förflyttas till en position rakt under hanteringscellen. Ett ventilationssystem ansluts och normalt luftryck etableras i transportbehållaren. Vagnen och behållaren lyfts nu med hydraulmotorer upp mot hanteringscellens golvgenomföring. Dockningen avslutas med att en gummitätning luftfylls.

Med hjälp av traversen i hanteringscellen lyfts golvpluggen i genomföringen mot transportbehållaren bort. Transportbehållarens innerlock lyfts upp varefter bränslet i transportbehållaren kan lyftas över till en kopparkapsel eller placeras i hanteringscellens buffertlager. Då bränslet ska flyttas till en kapsel demonteras först kapselinsatsens stållock, med hjälp av en med magneter försedd lyftutrustning, varefter bränsleelement kan placeras i kapseln.

När kapseln blivit fylld monteras kapselinsatsens stållock. De efterföljande momenten med bland annat locksvetsning och oförstörande provning motsvarar de för inkapslingsanläggningen vid Clab, se avsnitt 8.1.1.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Vid granskningen av Fud 2001 framkom inga speciella synpunkter på inkapslingsanläggningen placerad vid djupförvaret.

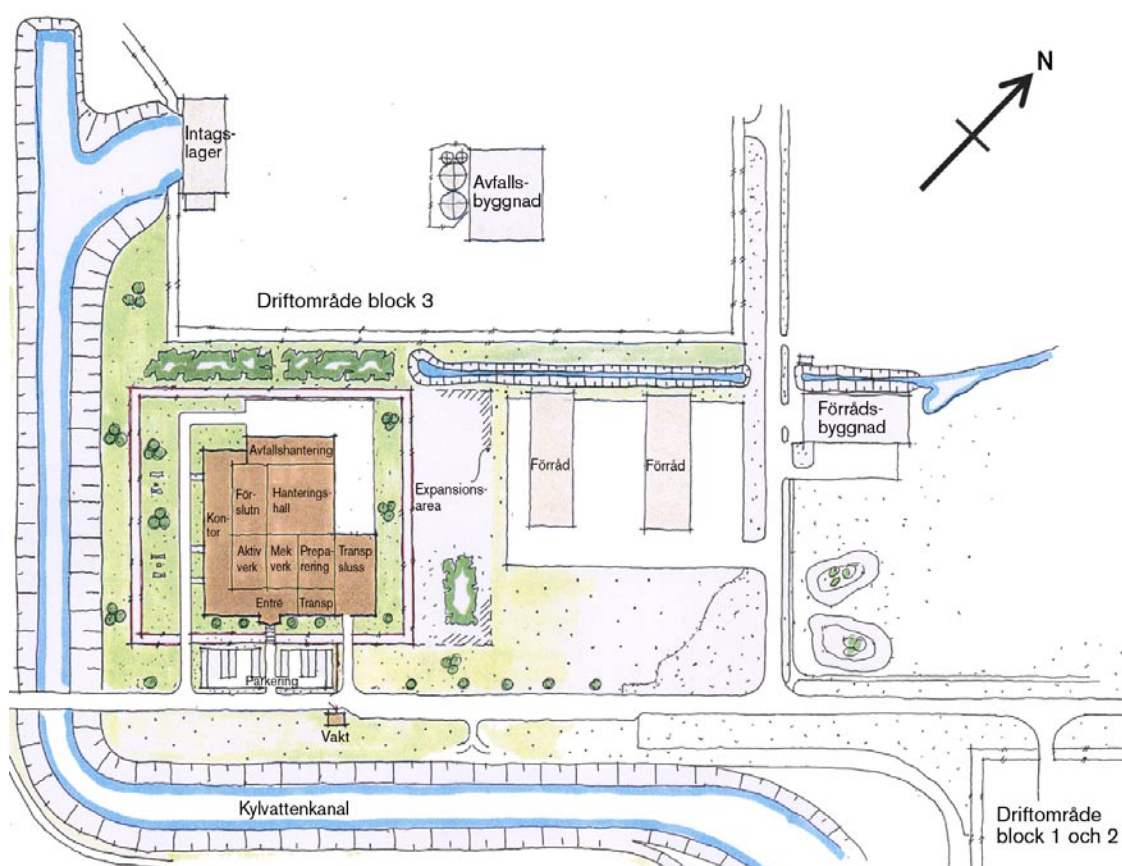
Nyvetenskap sedan Fud 2001

En möjlig placering av en fristående inkapslingsanläggning i Forsmarksområdet är mellan driftområdet för kärnkraftverket Forsmark 3 och driftområdet för Forsmark 1 och 2. Denna placering framgår av figur 8-4.

Program

Samrådsprocessen avseende ett eventuellt djupförvar i Forsmark beaktar även det alternativ vid vilket också inkapslingsanläggningen förläggs dit. Miljökonsekvenserna av detta kommer att belysas. Någon projektering av anläggningen är inte planerad.

Ett eventuellt beslut om lokalisering av en inkapslingsanläggning vid Forsmark skulle ge en kraftig påverkan på SKB:s huvudtidsplan och kostnader. Vissa delar eller funktioner från den projekterade inkapslingsanläggningen vid Clab skulle kunna överföras till den fristående anläggningen, men hela bygg- och anläggningslayouten skulle behöva göras om från början. Eftersom förutsättningen för anläggningen är torr hantering av bränsle måste en genomgående studie genomföras för verksamheten vid Clab eftersom sortering, verifierande mätningar samt torkning av bränslet då måste ske i den befintliga anläggningen. Den förstudie som genomförts visar att Clab kan användas, men en förnyad genomgång kan behövas med bland annat de nya förutsättningar som gäller efter utbyggnaden av Clab.



Figur 8-4. Möjlig placering av en fristående inkapslingsanläggning i Forsmarksområdet.

8.3 Fysiskt skydd

Begreppet fysiskt skydd omfattar den bevakning och de andra åtgärder som vidtas för att förhindra obehörig åtkomst eller yttre åverkan av kärnavfall eller kärnämne. Det fysiska skyddet anpassas efter lagstiftning och föreskrifter.

SKI:s föreskrift för fysiskt skydd ingår som en konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen. För hantering och transporter finns ett fungerande system för fysiskt skydd. Anläggningens bevakade område kommer att vara inhägnat med staket och annan övervakningsutrustning kommer att finnas i likhet med vad som krävs för kärntekniska anläggningar. Tillträde till området kommer att vara reglerat och kontrollerat på motsvarande sätt som vid de kärntekniska anläggningar som drivs i dag. Inkapslingsanläggningens byggnader kommer att integreras med Clabs skyddsområde och skalskydd.

8.4 Safeguards

Sverige har genom internationella överenskommelser, till exempel ickespridningsavtalet, Euratomfördraget och flera bilaterala avtal, förbundit sig att använda kärnämnen enbart för fredligt bruk, samt åtagit sig att redovisa all hantering av kärnämnen bland annat det använda kärnbränslet. Sverige har också accepterat att allt material av denna typ står under internationell kontroll. Denna så kallade safeguardskontroll utförs av Euratom och IAEA och på nationell nivå av SKI. Kontrollen syftar till att kontrollorganen i tid ska upptäcka om kärnämne avleds från systemet.

Kraven på safeguards från såväl svenska som internationella kontrollmyndigheter ska tillgodoses i inkapslingsanläggningen. I konstruktionsskedet beaktas detta genom att utrymmen ges i layouten för bland annat apparatrum, bränslemätutrustning, kameror och instrument för övervakning. Anläggningen kommer att utformas så att några tydliga så kallade Key Measuring Points (KMP) kan etableras exempelvis vid bränslehanteringsbassängen, i hanteringscellen efter att bränslet placerats i kapseln momentet innan locket läggs på, och i transportslussen innan kapseln transporteras ut ur anläggningen. Kapselkomponenterna är märkta individuellt och kan följas genom de olika stegen i hanteringen. Vid utformning av anläggningens layout tas även hänsyn till att möjligheterna att avleda kärnämne, "Diversion Routes", ska försvåras för att underlätta övervakningen. Den minsta enhet som kommer att kunna hanteras är ett bränsleelement.

Uppgifter om bränslets innehåll av kärnämne och annan information, som är relaterad till safeguards, är den som finns för det bränsle som lagras i Clab. Verifiering av bränslets resteffekt kommer att ske genom gammamätningar, vilka enligt planerna ska utföras i inkapslingsanläggningen. Denna mätposition kan även användas av tillsynsorganen för deras egna mätningar. Möjlighet finns också att "dela" på signalen från mätsönderna.

Varje kapsel kommer att få en unik identitet som är möjlig att kontrollera visuellt. Det administrativa safeguardssystemet håller reda på vilka bränsleelement som finns i varje kapsel. Visuell verifiering av bränslets identitet kan göras innan kapslarna försluts. Denna information kan inhämtas via TV-kamera och lagras i digital form. Efter förslutning och kontroll placeras kapslarna i transportbehållare. Även transportbehållarna har en unik identitet, som administrativt kopplas till innehållet och möjliggör kontroll. Transportbehållarna placeras i ett övervakat förråd i väntan på transport till djupförvarsanläggningen. Det totala antalet behållare, som behövs för transporterarna, beror på den geografiska placeringen av djupförvaret. Hanteringen av transportbehållarna kommer att ske enligt samma principer som gäller för transport av använt bränsle från kärnkraftverken till Clab.

I det fall där inkapslingsanläggningen byggs i anslutning till Clab kommer denna att tillhöra samma Material Balance Area (MBA), som Clab. Detta underlättar den administrativa hanteringen för både operatör och tillsynsorgan.

Genom SKB:s deltagande i internationella arbetsgrupper inom området safeguards för slutförvar där inkapsling är ett delmoment har grupper från EU (Esarda) och IAEA studerat Kapsellaboratoriet och deponering av kapslar vid Äspö. Detta har gett en ökad förståelse för hela processen med hantering av använt bränsle från Clab till djupförvaret. Bland annat delar både Euratom och IAEA uppfattningen att SKB bör ha en MBA för inkapslingsanläggningen och Clab i det fall där inkapslingsanläggningen byggs i anslutning till Clab. Vid en fristående inkapslingsanläggning blir denna en självständig MBA.

Utvecklingen inom safeguards att komplettera eller delvis ersätta traditionell safeguards (sigill, kamera inspektioner etc) med en indirekt kontroll, som exempelvis mätningar i omgivningen och inhämtning av öppen information, oanmälda inspektioner etc, kommer naturligtvis att påverka safeguardssystemets utformning vid tidpunkten för tillståndsansökan /8-4/.

9 Transporter av inkapslat bränsle

9.1 Inledning

I detta kapitel beskrivs transporterna av kapslar från inkapslingsanläggningen till djupförvarsanläggningens mottagningsbyggnad. Inkapslingsanläggningen förutsätts vara belägen intill Clab i Simpevarp, medan djupförvaret är beläget på någon av de platser som är föremål för platsundersökningar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Jämfört med den redovisning av kapseltransporter som finns i Fud 2001 har inga större förändringar skett. Granskningskommentarerna var fåtaliga men en huvudpunkt var att beskrivningen var för kortfattad. Transporter av inkapslat bränsle beskrivs därför i ett eget kapitel i Fud 2004.

SKI konstaterade i sin granskning att det nuvarande transportsystemet för använt kärnbränsle och kärnavfall har fungerat bra och är ändamålsenligt.

Frågan om alternativa transportsätt (järnvägstransport) för kapslarna saknar aktualitet så länge djupförvaret antas ligga nära antingen Simpevarp eller Forsmark. Skulle någon annan placering senare bli aktuell får frågan tas upp på nytt.

Inom transportområdet pågår ett utbyte av erfarenheter med andra länder, både inom ramen för IAEA:s verksamhet och i andra sammanhang. SKB kommer även i fortsättningen att delta aktivt i detta arbete.

9.2 Behovet av transporter

Driften av djupförvarsanläggningen och inkapslingsanläggningen bygger på att transporter av färdiga kapslar kan pågå mer eller mindre kontinuerligt mellan de två anläggningarna, se figur 9-1.

Varje transportbehållare, se avsnitt 9.3.3, rymmer en kapsel, och väger 70–75 ton inklusive last när den transporteras. Detta är något mindre än den behållare som används för att transportera bränsle till Clab. De tömda behållarna går i retur och kan användas hur många gånger som helst.

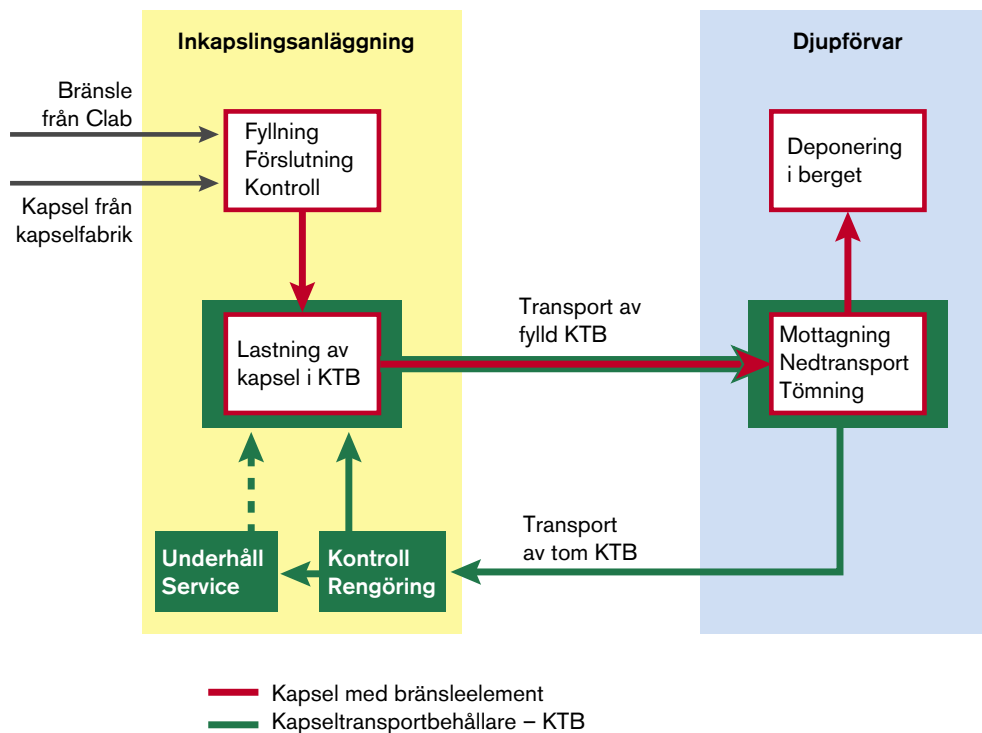
Eftersom inkapslingsanläggningen dimensioneras för en produktionskapacitet av 200 kapslar per år, ska transportsystemet kunna transportera cirka 200 transportbehållare per år tur och retur mellan anläggningarna.

9.2.1 Sjötransport

Om djupförvaret placeras i Forsmark kommer transporterna av kapslar att ske sjövägen, med upp till ett tiotal behållare i varje transport.

Mellan Forsmark och Simpevarp går i dag m/s Sigyn med använt bränsle till Clab och avfall till SFR. Sträckan är 250 distansminuter lång och tar cirka 20 timmar. Ett framtida fartyg kan beräknas ha ungefär samma storlek och lastkapacitet.

Om tio behållare med kapslar lastas per gång krävs det 20 resor för att transportera den nominella årsproduktionen. Inget hinder finns för samlastning med avfalls- eller bränsletransportbehållare, under den tidsperiod när sådana transporter pågår.



Figur 9-1. Flödesschema för transporterna från inkapslingsanläggning till djupförvar:

Ligger både inkapslingsanläggningen och djupförvaret i Simpevarpstrakten blir det endast fråga om landtransporter.

9.2.2 Landtransport

Om djupförvaret placeras i närheten av Clab transporteras kapseltransportbehållarna med ett terminalfordon från inkapslingsanläggningens uttransportsluss till djupförvarsanläggningens mottagningsbyggnad.

I Forsmark transporteras kapseltransportbehållare från fartyget i hamnen, som är belägen intill SFR, till djupförvarsanläggningens mottagningsbyggnad. Kapseltransportbehållare transporteras en och en med ett terminalfordon som hämtar behållaren inne i lastrummet och lämnar av den inne i mottagningsbygganden.

9.2.3 Alternativ för transporterna av kapslar

Med utgångspunkt från de pågående platsundersökningarna kan man anta att vägsträckan för att nå djupförvaret i båda fallen blir några kilometer. Därmed är det inte aktuellt att föreslå transporter med järnväg.

Placeras inkapslingsanläggningen i anslutning till ett djupförvar i Forsmark behövs det två transportmoment:

- *Transport av bränsleelement*, liknar de transporter som görs till Clab från de olika kärnkraftverken. Clab-anläggningens utformning medger, efter komplettering av utrustningen, uttransport av bränsle från mottagningsdelen.
- *Transport av kapslar* en kort sträcka till djupförvarsanläggningen.

9.3 SKB:s transportsystem – utrustning och funktion

Transportsystemet togs i drift delvis 1983 och i sin helhet 1985. Dess huvuduppgift är att transportera använt kärnbränsle till Clab och radioaktivt avfall till SFR. SKB ansvarar för driften av transportsystemet och äger utrustningen i systemet. De viktigaste komponenterna är fartyget m/s Sigyn, transportbehållarna och terminalfordonen. Transporter planeras av driftavdelningen på SKB och utförs i samverkan mellan många organisationer. Avtalet för driften av fartyget Sigyn är skrivet med Rederi AB Gotland, vars dotterbolag Destination Gotland bemannar och driver fartyget.

9.3.1 Dagens transportsystem för använt kärnbränsle och driftavfall

Varje år genomförs i genomsnitt 20 fartygstransporter med använt bränsle och förbrukade hårdkomponenter i transportbehållare från kärnkraftverken till Clab, samt cirka tio transporter av driftavfall till SFR i Forsmark. Även från Studsvik transporteras avfall till SFR. Avfallskollina transporteras antingen i tunga behållare (ATB) eller i containrar beroende på hur radioaktivt avfallet är.

Använt bränsle och hårdkomponenter från Oskarshamnsverket transporteras lokalt landvägen till Clab med samma transportbehållare som från övriga kraftverk. För avfallstransporterna lokalt i Forsmark till SFR används en speciell avfallstransportbehållare.

9.3.2 Erfarenheter av driften

Erfarenheter av cirka 20 års drift visar att transportsystemet är driftsäkert och fungerar väl och har kapacitet att genomföra planerade transporter.

Mängderna använt bränsle, som årligen transporteras till Clab från kärnkraftverken, har under senare år stabiliserat sig på cirka 230 ton, vilket motsvarar cirka 75 transportbehållare per år. Alla kärnkraftverken har minskat antalet avfallstransporter till SFR och trenden är stadig nedåtgående.

Fartyget Sigyn

Fartyget som togs i drift 1982 har genomgått omfattande moderniseringar och förändringar under åren. Förutom normalt underhåll har bland annat följande åtgärder genomförts: byte till lågsvisvlig olja, utbyte av värmesystem, utbyte av övervakningsutrustning för last och maskinrum, nya brandsläcknings- och övervakningssystem, dubbelskrov för bränsletankar, och installation av katalysatorer vilket reducerat utsläppen av kväveoxider med över 80 procent.

Inspektioner av skrov och tankar genomförs regelbundet. Vid en noggrannare genomgång av experter från Chalmers 1999 konstaterades att fartyget är i gott skick och bör kunna brukas till 2010 utan ökat underhåll. Navigationsutrustningen med elektroniska sjökort och den nyligen utbytta radaranläggningen är moderna och av hög standard.

Hamnarna vid kärnkraftverken, som fartyget besöker, är anpassade till fartyget och förtöjningsarrangemangen är goda. Ringhals inseglingsled och hamnbassäng muddrades 2002 vilket medfört förbättrade manövreringsförhållanden.

Det finns rutiner för att rapportera incidenter och avvikelser till SKB och rederiet. Endast ett fåtal materiella skador har rapporterats och några personskador har inte rapporterats.

Transportbehållare för använt kärnbränsle (Typ B-behållare)

SKB äger tio transportbehållarna för använda bränsleelement av modell TN17-2 och två transportbehållare för hårdkomponenter av modell TN17-CC. Behållarna är tillverkade 1982–84.

Bränsletransportbehållarna har till och med 2003 använts 130 till 150 gånger var och behållarna för hårdkomponenter ett sextiotal gånger var. Transportbehållarna har fungerat bra. Anslutande utrustningar har också visat sig vara driftsäkra. Förbrukningen av reservdelar har inte visat någon nämnvärd uppgång med tiden.

Terminalfordon

SKB äger fem stycken terminalfordon. Ett finns på SFR i Forsmark och de övriga hör hemma vid Clab. Terminalfordonen transporteras som regel med m/s Sigyn till kraftverken för att användas till de lokala landtransporterna av bränsle- och avfallstransportbehållare.

Terminalfordonen vid Clab genomgick 1997–2001 en helrenovering då bland annat dieselmotorer och styrhytter byttes. Det femte fordonet renoveras under 2004 till samma standard som de övriga. Fordonen fungerar bra och bedömningen är att de kan nyttjas ytterligare cirka tio år utan behov av större ändringar.

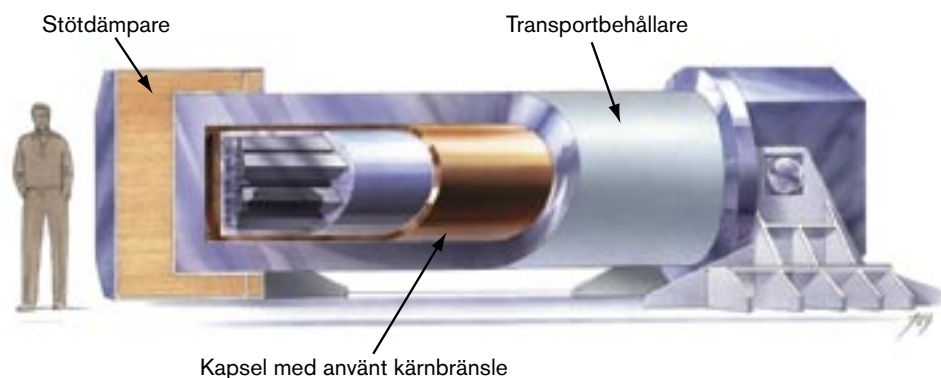
9.3.3 Transport av inkapslat bränsle

Kapseltransportbehållare

En förstudie utfördes i mitten av 1990-talet beträffande en transportbehållare för kapslar. En mer detaljerad projektering av en kapseltransportbehållare pågår under 2004. Grunddragen väntas inte avvika från de tidigare föreslagna, vilka beskrivs i korthet nedan.

Behållarens huvuduppgift är att utgöra strålskärm för den inneslutna kapseln, så att den kan hanteras under transporten utan ytterligare strålskärning. Den ska också uppfylla de övriga kraven för Typ B-behållare enligt IAEA:s transportrekommendationer, se avsnitt 9.4, på bland annat hållfasthet och värmetålighet, samt ha förmåga att leda ut den avgivna resteffekten, så att varken kapseln eller behållarens yta blir för varm. En transportbehållare med kapsel visas i genomskärning i figur 9-2.

Den planerade behållaren, som får en diameter på ungefär 1,6 meter, tillverkas i gjutjärn med en tjocklek av mellan 250 och 300 millimeter. Godstjockleken bestäms av behovet av strålskärning. Järn dämpar inte neutronstrålningen lika bra som gammastrålningen och behållarens mantel förses därför med ett antal kanaler som fylls med ett plastmaterial som absorberar neutronstrålning. I lock och botten finns en neutronabsorberande matta, som också fungerar som ett extra stötskydd för kapseln inuti behållaren. Locket som tätar mot behållarmanteln kan vara antingen bultat eller gängat. Behållarens vikt, inklusive lock, blir omkring 40 ton, med kapsel och lastbärare totalt cirka 75 ton. Lockets vikt är 1,5–2 ton. Behållaren har lyftappar i båda ändar, fastbultade i manteln. Lyftapparna används dels för att lyfta behållaren, dels för att fixera den i horisontellt läge.



Figur 9-2. Kapseltransportbehållare i genomskärning.

Fartyg, lastbärare och terminalfordon

Så småningom kommer det att bli aktuellt att anskaffa ett nytt fartyg som ska efterträda m/s Sigyn. Även om detta inte är omedelbart förestående, så kommer fartyget med största sannolikhet att vara i drift långt innan kapseltransporterna påbörjas. Dessa berör överhuvudtaget inte driften av fartyget om djupförvaret placeras i Oskarshamn. Det nya fartyget anpassas för fortsatta bränsle- och avfallstransporter och kommer att fylla samma funktion som det nuvarande.

Behållaren vilar under uppställning och transport på en lastbärare med upplag för lyfttapparna. Lastbäraren blir jämförbar med dem som används i dag, det vill säga en som kan hanteras av terminalfordonet. Figur 9-3 visar en lastbärare med en hårdkomponentbehållare.

De fordon som används i dag kommer så småningom att falla för åldersstrecket, se avsnitt 9.3.2, men annars finns inga planer på några dramatiska förändringar av tekniken för landtransporter. De tunga enheterna kräver stora fordon med många hjulaxlar.

Vägar

Det kommer att krävas förstärkning av befintliga vägar och delvis nyanläggning av vägar i samband med uppförandet av djupförvarsanläggningen, inte minst för att möta behovet av alla andra transporter under bygg- och driftskedet.

Enligt de platsundersökningar som pågår kan vi tills vidare anta att transportsträckan till djupförvarsanläggningens mottagningsbyggnad blir relativt kort. Det innebär att transport i låg hastighet inte medför några större problem. Transporten på väg kan därför jämföras med dagens landtransporter mellan hamn och anläggningar. Projektering av vägar och val av exakt färdväg ingår i arbetet under platsundersökningskedet.



Figur 9-3. Lastbärare med en transportbehållare för hårdkomponenter.

9.3.4 Samordning med dagens transportsystem

När kapseltransportbehållare ska börja transporteras, kommer rutinmässiga transporter till Clab och SFR fortfarande att pågå. Den nya typen av behållare kommer att hanteras och administreras på samma sätt som de tidigare. Således kommer kapseltransporterna att integreras i transportverksamhetens tidsplanering, föransmälan (transportmeddelande) att utfärdas, och rutinerna runt transporterna att likna dem som redan finns.

De tillkommande kapseltransporterna innebär att ytterligare en slags behållare ska hanteras av systemet. Varken tekniskt eller organisatoriskt innebär dessa transporter någon principiell skillnad jämfört med i dag. Kapaciteten i systemet blir beroende på dels antalet kapseltransportbehållare dels personal- och tidsresurser. Vilka kommer att anpassas så att tillräcklig transportkapacitet uppnås för inkapslingsanläggningens och djupförvarsanläggningens behov.

Eftersom det i dag återstår åtskilliga år tills kapseltransporterna kommer igång, kan man förutse att det kan ha införts tekniska och organisatoriska förändringar under mellantiden av andra orsaker än att kapseltransporter ska påbörjas.

9.4 Krav och förutsättningar för transporter

Det finns såväl internationella rekommendationer och överenskommelser som nationella lagar och bestämmelser för transport av farligt gods, dit radioaktiva ämnen räknas.

9.4.1 Transportbestämmelser

FN:s internationella atomenergiorgan, IAEA, har utfärdat transportrekommendationer /9-1/, vilka utvecklats i samråd med och godkänts av medlemsländerna, däribland Sverige. IAEA:s rekommendationer har sedan legat till grund för internationella bestämmelser för transporter till sjöss, till lands, med järnväg och med flyg, samt deras svenska motsvarigheter. Dessa regelverk (se faktaruta) omfattar alla typer av farligt gods, men för radioaktiva ämnen bygger föreskrifterna på IAEA:s rekommendationer och är i stort sett desamma i alla regelverken.

Bestämmelserna täcker olika slags transportmedel, och såväl transport inom ett land som mellan och genom olika länder. Huvudpunkterna vid transport av radioaktivt material är följande:

- Minimikrav på transportbehållartyp beroende på godsets beskaffenhet, det vill säga fysikalisk form, kemisk sammansättning samt mängd radioaktiva ämnen.
- Regler beträffande högsta tillåtna strålningsnivåer utanpå behållare eller fordon.
- Märkning och klassificering avseende strålningsnivå.
- Regler för hantering, stuvning och samlastning med annat gods.
- Checklistor för åtgärder i händelse av olycka (för transport- och räddningspersonal).
- Krav på innehåll i transporthandlingar.

Tillämpliga internationella och svenska föreskrifter:

- IMDG Code – International Maritime Dangerous Goods Code (Internationella regelverket för sjötransport av farligt gods).
- SJÖFS 2003:15 – IMDG-koden. Svensk ansvarig myndighet är Sjöfartsverket.
- ADR – Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (Europeisk överenskommelse om internationell transport av farligt gods på väg).
- ADR-S – Statens räddningsverks föreskrifter för inrikes väg- och terrängtransport av farligt gods.
- RID – Règlement concernant le transport international des marchandises dangereuses par chemin de fer (Regelverk för internationell järnvägstransport av farligt gods).
- RID-S – Statens räddningsverks föreskrifter för inrikes järnvägstransport av farligt gods.

Transportbehållare

Använt kärnbränsle, även inkapslat sådant, ska på grund av innehållet av radioaktiva ämnen, transporteras i typ B-behållare enligt IAEA:s transportrekommendationer.

En behållare som godkänts enligt kraven för typ B har en mycket stor förmåga att motstå påfrestningar även vid allvarliga olyckor utan att förlora sin täthet eller strålskärmande förmåga. Det verifieras både genom beräkningar och genom specificerade tester, som utförs med en prototypbehållare. Testerna inkluderar fallprov från nio meter mot stumt underlag, fall mot spetsigt testobjekt, värmeprov motsvarande en kraftig brand på 800 °C under 30 minuter samt trycktest motsvarande vattentrycket på 200 meters djup. I allmänhet klarar transportbehållare för bränsle mer än dessa krav, eftersom behovet av strålskärning ger behållaren en mycket kraftig konstruktion.

Behållarens konstruktion granskas av ansvarig myndighet som utfärdar en behållarlicens, som bland annat anger vad behållaren får innehålla. Licens för användning i Sverige utfärdas av Statens kärnkraftinspektion (SKI) eller av Statens strålskyddsinstitut (SSI).

9.4.2 Tillstånd

De övergripande svenska bestämmelserna för hantering och transport av radioaktiva ämnen återfinns i kärntekniklagen, strålskyddslagen och lagen om transport av farligt gods. De tillståndsgivande myndigheterna är SKI och SSI.

De tillstånd som behövs för att transportera kärnämne eller kärnavfall är av två huvudtyper:

- Tillstånd för att med det aktuella transportsystemet (utrustning och organisation) utföra transporter av kärnämne/kärnavfall.
- Godkännande av att ett visst slags gods, till exempel transportbehållare för viss avfallstyp, får transporteras.

Med tillstånden följer olika villkor, såsom:

- Att transportbestämmelser ska följas.
- Att föranmälan av planerade transporter sker.
- Att data för avfallet som transporteras ligger inom vissa gränser.

Man söker tillstånd för transport av sådant gods som förväntas bli aktuellt. Om något nytt godslag tillkommer, får ett förnyat tillstånd sökas.

Varje företag och organisation som genomför transporter av vad som definieras som farligt gods ska ha en säkerhetsrådgivare inom organisationen. Denna ska vara utbildad på gällande regler och vara företagets interna expert på tillhörande frågor. Inom SKB upprätthålls denna befattning för närvarande av samma person som har det övergripande driftansvaret för transporterna till Clab och SFR.

9.4.3 Tillämpning för kommande transporter

Om det vore aktuellt i dag att börja transportera kapslar, skulle SKB således söka tillstånd för att med befintligt transportsystem hantera ytterligare en slags behållare utöver dem för vilka dagens tillstånd gäller.

Gällande transportregler ska givetvis tillämpas vid genomförandet av transporterna från inkapslingsanläggningen till djupförvarsanläggningen. Det förenklas av att hela transporten sker i egen regi. Egna hanteringsinstruktioner och standardiserade transportdokument och datafiler kommer att finnas.

Transporter av kapslar ska följa samma principer beträffande ansvarsfördelning, tidsplanering, föransmälan, överlämning och fysiskt skydd som vid bränsletransporter till Clab.

Varje kapsels innehåll beslutas långt före inkapslingstillfället. Vilka kapslar som ska transporteras specificeras i föransmälan (transportmeddelande). En kapsel som godkänns efter förslutning i inkapslingsanläggningen godkänns samtidigt för transport till deponering. Transportbehållarna för kapslar är utformade för en kapsel med dimensionerande innehåll (aktivitetsinnehåll, resteffekt etc). Den detaljerade dokumentationen över varje kapsel och dess innehåll finns noga registrerad, men saknar intresse under transporten.

9.4.4 Safeguards

Kraven på kärnämneskontroll (safeguards) innebär att en detaljerad bokföring ska göras av allt kärnämne. Efter inkapsling utgör kapseln en minsta enhet. Bokföringen bygger på de register som i dag finns i Clab i SKB:s datoriserade bränsleregister.

Från safeguardssynpunkt kommer transporten av kopparkapseln att ske på samma sätt som de transporter som sker i dag av använt kärnbränsle från kärnkraftverken till Clab. De handlingar som krävs för safeguards kommer att tas fram och skickas från inkapslingsanläggningen/Clab (gemensamt MBA) till mottagaren som är djupförvaret (eget MBA) och till berörda instanser, SKI och Euratom. Transportplaner och föransmälan för transport av kapslar till djupförvaret kommer även att redovisas till SKI och Euratom i god tid före transport.

De administrativa åtgärder som behövs för safeguards sker före respektive efter transporten mellan inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

9.5 Program

9.5.1 Transportsystem i drift

SKB:s transportsystem som i dag används för transporter av använt bränsle och förbrukade hårdkomponenter från kärnkraftverken till Clab och av avfall från kraftverken samt Studsvik till SFR kommer att fortsätta med detta så länge det produceras använt bränsle och avfall. Ett tillfälligt avbrott i bränsletransporterna görs under andra och tredje kvartalet 2004 i samband med att Clab etapp 2 tas i drift.

Transportsystemets utrustning underhålls regelbundet och moderniseras vartefter. M/s Sigyn underhålls så att fartyget kan vara i full drift åtminstone fram till 2010. I planeringen ingår att m/s Sigyn kommer att ersättas med ett nytt fartyg. Kraven på det nya fartyget är inte preciserade i dag. Eftersom hamnarnas mått och transportsystemets behov inte kommer att vara annorlunda än i dag, kan m/s Sigyn när det gäller storlek och egenskaper tills vidare användas som utgångspunkt även vid planeringen av transporter till djupförvaret, om detta placeras i Forsmark.

Terminalfordonen kommer så småningom av åldersskäl också att ersättas. Gamla och nya fordon kommer att kunna arbeta parallellt under en övergångsperiod.

Eventuella förslag på förändringar i lasthanteringen kommer först att studeras så att även dagens transporter kan genomföras.

9.5.2 Utrustning för kapseltransport

En transportbehållare för kapslar projekteras, se avsnitt 9.3.3. Till de nya transportbehållarna behövs lastbärare som kan hanteras i inkapslingsanläggningen och i djupförvaret samt tillsammans med transportsystemets fordon och fartyg. Lastbärarna kommer att projekteras tillsammans med behållarna.

För planeringen av transporter till djupförvarsanläggningen sker en samordning med inkapslingsanläggningen (projekt Inka) och med djupförvarsprojektet, framför allt när det gäller att utforma utrustningen för att hantera kapseltransportbehållare och tillhörande transportutrustning.

Utöver tekniska data om storlek, vikt, utformning av lastbärare och liknande, måste till exempel frågor om underhåll av behållare, uppställning av tomma eller fyllda behållare och andra logistikfrågor för kapseltransportbehållarna behandlas gemensamt.

9.5.3 Redovisningar

En relativt heltäckande redovisning av kapseltransporterna är en del i redovisningen av djupförvaret och kommer att ingå i ansökan för djupförvaret. En lägesrapport ska redovisas som underlag till ansökan för inkapslingsanläggningen.

Materialet kommer att arbetas fram successivt. Det blir emellertid inte några omfattande utredningar, eftersom ett fungerande transportsystem sedan länge finns i drift. De förändringar i SKB:s transportsystem, som kommer att göras fram tills dess djupförvaret tas i drift, blir i huvudsak de som ändå skulle ha genomförts på grund av behov av modernisering och eventuella nya föreskrifter, avtal eller dylikt.

10 Djupförvar – teknik

Att utveckla och demonstrera metoder och teknik för att bygga, driva och försluta djupförvaret är en viktig del av SKB:s arbete. Detta utvecklingsarbete syftar till att säkerställa att metoder och material, samt den teknik som behövs för att bygga djupförvaret, finns tillgängliga och att dessa motsvarar ställda krav. Det utgör också ett viktigt underlag för planeringen. Valet av material, deponeringsteknik etc beror bland annat på de krav som ställs på anläggningen under olika skeden, till exempel krav på driftsäkerhet och långsiktig säkerhet. SKB undersöker också möjligheterna att modifiera referensmetoden och deponera kapslarna horisontellt.

SKB bedriver egen teknikutveckling, deltar aktivt i olika europeiska samarbetsprojekt och följer andras arbete på området. Vid Äspölaboratoriet genomförs utveckling, tester och demonstrationer inför byggandet och driften av djupförvaret. Där tillämpas olika tekniska lösningar i full skala och i realistisk miljö.

10.1 Bergbyggnadsteknik

10.1.1 Krav och förutsättningar

Val av bergbyggnadsteknik ska göras mot bakgrund av följande krav:

- Byggande och drift ska ge begränsad påverkan på bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner.
- Tekniska egenskaper beträffande bärförmåga och stadga, brandsäkerhet, hälsa och miljö och olycksrisk ska ge säkerhet för brukare och besökare.
- Undersökningar av berget, bergarbeten och drift ska kunna pågå parallellt, men inom separata områden.
- Utbyggnad ska kunna ske i önskad takt och på ett kostnadseffektivt sätt med viss flexibilitet.
- Miljöpåverkan ska vara begränsad.
- Närboende ska störas i så liten utsträckning som möjligt.

Kraven påverkar såväl system- och materialval som val av metoder för utförande. Valen kan påverkas av information som kommer fram vid platsundersökningarna.

10.1.2 Teknik för berguttag

Utbyggnaden av djupförvarsanläggningen innebär att stora volymer berg kommer att tas ut vid byggandet av ramp, schakt, centralområde, stamtunnlar, deponeringstunnlar och deponeringshåll. Kring de hålrum som skapas i berget kommer spänningsomlagringar och deformationer att ske.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterade SKB att:

- Tunneldrivning kan göras med konventionell borrhning och sprängning eller genom mekanisk brytning. Båda metoderna har använts med gott resultat vid drivning av tunnlar vid Äspölaboratoriet.
- Den skadezon som skapas vid berguttaget med de två metoderna har undersökts och slutsatsen var att mekanisk brytning gav en mindre skadezon.
- Metoder för borrhning av deponeringshålen finns. Borrhning av deponeringshåll i full skala har demonstrerats vid Äspölaboratoriet.

Baserat på i huvudsak befintligt material kan val av och vidareutveckling av drivningsmetoder, maskiner och utrustning ske parallellt med framtagning av projekteringsunderlag för utbyggnad och detaljundersökning av djupförvarsanläggningens undermarksdel. Handlingsfrihet när det gäller val av metoder för drivning av deponeringstunnlar och deponeringshål kommer att kvarstå även efter påbörjad deponering.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

En ny tunnel, Apse-tunneln, har byggts vid Äspölaboratoriet på 450 meters djup under våren och sommaren 2003, se figur 10-1. Tunneln är omkring 70 meter lång och berguttaget har skett med borrhning och skonsam sprängning.

Sprängskadezonen runt den nya tunneln har hittills undersökts preliminärt i tunnelgolvet. Resultaten av dessa undersökningar indikerar att:

- Borrhingsprecision har betydelse för skadezonen.
- Moderna riktinstrument på borrhjulen ger en tillfredsställande möjlighet att kontrollera borrhprecision, och därmed indirekt också sprängskadezonen.
- Av 13 borrhade kärnborrhål i tunnelgolvet observerades makroskopiska sprickor med ett djup på cirka tio centimeter i tolv av hålen, och 30 centimeter i ett av hålen.
- I tre borrhade hål i tunnelgolvet (diameter 1,75 meter) bekräftas bilden från kärnborrhålen avseende sprickornas djup. De makroskopiska sprickorna är naturliga sprickor som skjuvats eller öppnats av sprängning och/eller spänningsomlagringar. Eftersom de inducerade sprickorna endast delvis är planparallella med tunnelkonturen förefaller utbredningen av skadezonen vara heterogen.



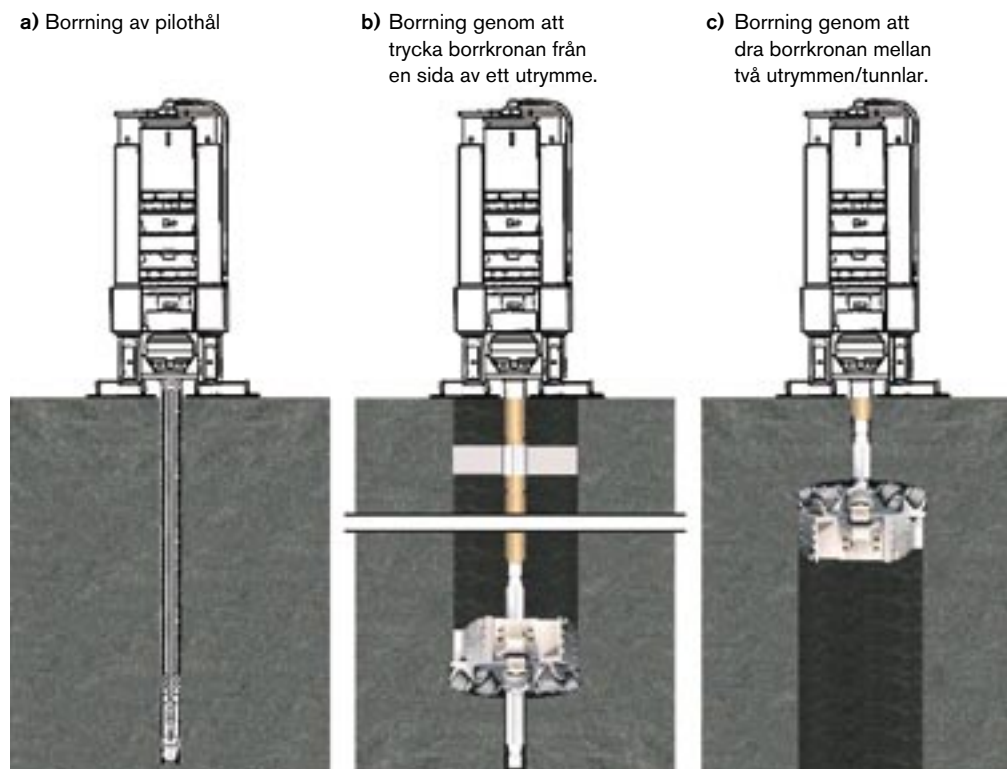
Figur 10-1. Den nya Apse-tunneln vid Äspölaboratoriet som drivits under sommaren 2003 med skonsam borrhning och sprängning.

De metoder som i dag bedöms var möjliga för borrning av deponeringshålen är: fullareaborrning med schaktbörningsmaskin (SBM) eller borrning av ett pilothål och efterföljande upprymningsbörning med en större borrkrona enligt figur 10-2 (a och b). Kärnbörning respektive hammarbörning har diskuterats för att åstadkomma deponeringshål men bedöms inte vara konkurrenskraftiga alternativ.

Fullareaborrning av deponeringshål i full skala har demonstrerats vid Äspölaboratoriet, där totalt 16 deponeringshål har borrats, med SBM. Posiva har borrar av två fullstora deponeringshål med borrning av pilothål följt av upprymningsbörning till deponeringshålets diameter i ett steg /10-1/.

En variant av upprymningsbörning benämns "raise boring" och tekniken diskuteras för uttag av deponeringstunnlar och andra utrymmen. I normalfallet används tekniken för att bygga schakt mellan två utrymmen i en gruva. Figur 10-2 beskriver principerna för tekniken. I ett första steg borrar ett pilothål (a) och sedan fästs en borrkrona på borrstången och genom att dra och rotera borrkronan (c) skapas ett schakt eller en tunnel. Schakt med en diameter i storleksordningen sex meter kan åstadkommas med dragande upprymningsbörning. Om större diameter önskas kan upprymningen ske i steg genom att efter första steget byta till en borrkrona med större diameter. Det är också möjligt att i stället för att dra borrkronan trycka och rotera den så att ett schakt eller tunnel uppstår.

Horisontell deponering av kapslarna studeras för närvarande av SKB och Posiva i samarbete och en demonstration av KBS-3H-metoden planeras vid Äspölaboratoriet. Enligt KBS-3H deponeras kapslarna med buffert i en perforerad behållare av stål i rad efter varandra i långa deponeringstunnlar som är 1,85 meter i diameter, se avsnitt 10.7. De deponeringstunnlar som ska borrar för demonstrationen ska vara raka och uppfylla snäva toleranser på bland annat diametern. En borrarutrustning baserat på vattenhammartekniken har byggts och testats under hösten 2003. Alternativa metoder för att borra horisontella deponeringstunnlar för KBS-3H finns och ett alternativ som diskuteras är borrning av ett pilothål följt av tryckande eller dragande upprymningsbörning till önskad diameter på deponeringstunneln.



Figur 10-2. Arbetsgången vid tryckande respektive dragande upprymningsbörning.

Program

SKB följer löpande pågående insatser avseende forskning och utveckling inom berg- och anläggningsteknik med syftet att säkerställa att kännedom om aktuell kunskap och teknik finns hos SKB.

Under hösten 2003 påbörjade SKB ett utredningsarbete med syfte att klargöra vilka metoder och tekniker som finns tillgängliga för att skapa olika utrymmen i berget såsom ramp, schakt, centralområde, stamtunnlar, deponeringstunnlar och deponeringshål. Speciellt för deponeringstunnlarna är det viktigt att skador på berget begränsas. Inom projektet, som beräknas pågå fram till år 2007, kommer förutom inventering av tillgängliga metoder och tekniker bedömningar att göras av möjlig utveckling av borrh- och sprängtekniker respektive mekanisk brytning fram till tidpunkten för när berguttag i djupförvaret ska genomföras. Projektet kommer att genomföras i två steg där det första steget, som avslutas under 2004, ska utgöra ett underlag för det preliminära valet av metoder och tekniker för berguttag som presenteras i Layout D1 för djupförvaret. Det andra steget i projektet, som avslutas under 2007, kommer att utgöra det slutliga valet av metoder och tekniker på vilket Layout D2 kommer att baseras.

Möjliga metoder för berguttag samt vilka metoder som ska studeras vidare har specificerats för olika utrymmen, se tabell 10-1. Preliminära referensmetoder i Layout D1 har markerats i tabellen. Bland de alternativ som valts för fortsatta studier återfinns bland annat konventionell borrhning och sprängning, borrhning med TBM samt opprymningsborrhning. Sprängning kommer att utföras skonsamt för att begränsa den skadezon som skapas runt uttagna bergutrymmen. Borrhning av horisontella demonstrationstunnlar vid Äspölaboratoriet planeras ske under 2004.

Olika studier för uppföljning av sprängskadezon planeras bland annat genom slitssågning i Apse-tunneln vid Äspölaboratoriet eller andra verifierande tester. Studier och kontroll av sprängskadezonen vid borrhning och skonsam sprängning av rampen i Onkalo i Finland diskuteras med Posiva.

Tabell 10-1. Möjliga metoder för berguttag för djupförvarets olika utrymmen.

| Utrymme i djupförvaret | Möjliga metoder | Metoder som kommer att studeras vidare |
|---|---|--|
| Ramp | Borrhning och sprängning TBM (tunnelborrningsmaskin) | Skonsam sprängning ¹ TBM |
| Skipschakt (blint) | Borrhning och sprängning SBM (schaktborrningsmaskin) | Skonsam sprängning med arbetsplattform och borrutrustning i sänkschaktet ¹ |
| Ventilations- och hisschakt | RBM (fullortsborrhning av schakt med "raise boring") | Dragande opprymningsborrhning ¹ |
| Centralområde och övriga bergtrum | Borrhning och sprängning Mekanisk fräsning | Skonsam sprängning ¹ |
| Stamtunnel | Borrhning och sprängning Mekanisk fräsning TBM | Skonsam sprängning ¹ TBM |
| Deponeringstunnlar, KBS-3V | Borrhning och sprängning Dragande opprymningsborrhning Mekanisk fräsning TBM | Skonsam sprängning ¹ TBM (med förbättrad design) Dragande opprymningsborrhning med service tunnel |
| Deponeringshål | SBM Tryckande opprymningsborrhning | SBM ¹ Tryckande opprymningsborrhning |
| KBS-3H, horisontella deponeringstunnlar | Vattenhammare i kluster Liten TBM Tryckande opprymningsborrhning Dragande opprymningsborrhning med servicetunnel | Vattenhammare i klusterformation Tryckande opprymningsborrhning utan servicetunnel Dragande opprymningsborrhning med servicetunnel |

¹ Preliminär referensmetod i Layout D1.

10.1.3 Tätning av berget med injektering

Tätning av anläggningen för att minska inläckaget av grundvatten krävs för att genomföra bygge och drift, däremot förutsätter KBS-3-systemet inte några långsiktigt bestående tätningsåtgärder. Stora inläckage innebär försämrad arbetsmiljö och yttre miljö. Grundvattenavsänkning ökar risken för inläckage av djupa grundvatten med hög salthalt (up-coning) vilket kan påverka förvarets funktion. Vidare krävs att de lokala inläckagen är begränsade för att det ska vara möjligt att placera in buffert och återfyllning på ett kontrollerat sätt. Tätning av djupförvarsanläggningen förutsätts huvudsakligen ske genom injektering i sprickor. Bedömningen av vilken injekteringsinsats som krävs och en uppskattning av mängden tätningsmaterial som behövs, utgör en del av projekteringsarbetet. Det höga vattentryck som råder på förvarsdjupet innebär andra förutsättningar än vad som är normalt vid bergarbeten i svenska vägtunnlar etc. Även små sprickor kan föra mycket vatten, och SKB:s arbete fokuserar därför på att förbättra möjligheterna att tätta just små sprickor. Vidare kan eventuella krav på den kemiska miljön i djupförvaret, bland annat pH-värde i grundvattnet, innebära att injekteringsmaterialen behöver anpassas efter detta; till exempel kan injekteringsmaterial som ger lakvatten med pH lägre än 11 komma att krävas.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB inledde i mitten på 90-talet forskning och utveckling avseende berginjektering utifrån en expertbedömning av kunskapsläge och utvecklingsbehov /10-2/. Bland annat påbörjades utveckling av modeller för att beskriva berg och injekteringsförlopp och för att karakterisera injekteringsmaterial liksom arbete för ta fram material för olika situationer. Eventuella krav på att cementmaterial i djupförvaret ska ge lakvatten med pH lägre än 11 medförde att ett särskilt projekt med målet att utveckla och kvalificera bruk med lågt pH startades.

Kasam anser att SKB bör studera olika metoder för injektering i sprickor med syfte att åstadkomma en bestående begränsning av vattengenomsläppligheten i det berg som kommer att omge djupförvaret, utan att den kemiska miljön i förvaret påverkas negativt.

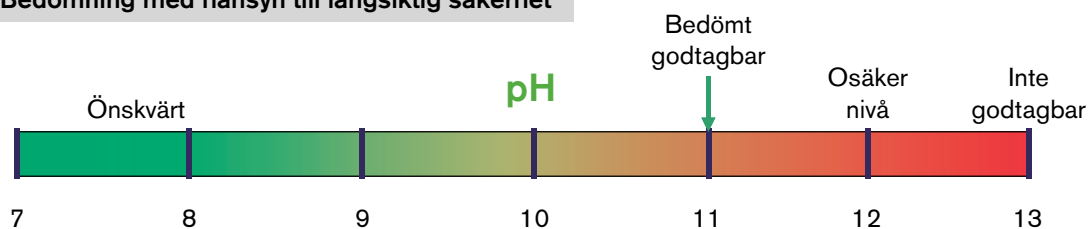
Enligt ovan så förutsätts en bestående begränsning av vattengenomsläppligheten inte i KBS-3-systemet och en bestående begränsning av vattengenomsläppligheten är inte heller möjlig att påvisa då det inte finns metoder för att påvisa ens 100 års beständighet för tillgängliga injekteringsmaterial. SKB delar alltså inte Kasams uppfattning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

En förstudie, som följts upp med en genomförbarhetsstudie, har gjorts i samarbete med Posiva och Numo i Japan för att ta fram och kvalificera cement med lågt pH för olika ändamål i djupförvaret, däribland för injektering i sprickor i berget. Målet för utvecklingsarbetet är att ta fram material som ger lakvatten med pH lägre än 11, se figur 10-3. Studierna har hittills inte resulterat i något recept på injekteringsbruk med lågt pH som uppfyller önskemålen om att det ska tränga in även i små sprickor. Slutsatsen blev att alternativa, ej cementbaserade material också ska undersökas, samtidigt som utvecklingsarbetet med cementbaserade bruk fortsätter. I det projekt som pågår sedan 2003 inriktas arbetet på utveckling av recept där Portlandcement, slaggcement, silica och ettringitaccelerator är huvudkomponenter. Ej cementbaserat material som undersöks är silica sol.

Sedan Fud 2001 har två doktorsavhandlingar presenterats som behandlar en metodik för bergkarakterisering inför injektering /10-3/ kopplat till modeller för bruksspridning /10-4/. Metodiken har testats vid bygget av Apse-tunneln vid Äspölaboratoriet. Detta innebar att systematisk förinjektering kunde undvikas tack vare att en detaljerad bergkarakterisering och en tidig bedömning av lämplig injekteringsmetodik kunde göras. Även om undersökningar ledde till förändringar i den planerade injekteringsinsatsen längs en del av tunneln gav en kombination av inflödesmätningar och tryckupbyggnadstester ett bra underlag för valet av bruk och en beredskap för att hantera mer extrema förhållanden. Mängden bruk som användes kunde begränsas samtidigt som tätningseffekten blev god /10-5/.

Bedömning med hänsyn till långsiktig säkerhet



Figur 10-3. Bedömning av accepterat pH i lakvatten från material i djupförvaret med hänsyn till långsiktig säkerhet.

Program

Injekteringsforskningen har som övergripande mål att se till att det finns kunskap, metoder, injekteringsmaterial och utrustning för att klara de tätningssituationer som uppstår med de särskilda krav som ställs på djupförvaret. Kunskapen om injektering har länge varit erfarenhetsbaserad, medan SKB:s program syftar till att öka den faktiska förståelsen för hur systemet berg, injekteringsbruk och injekteringsteknik fungerar. Sådan kunskap är nödvändig för att kunna kontrollera injekteringsprocessen. Satsningen på doktorandprojekt syftar också till att säkerställa att injektering finns som en levande disciplin där ny kunskap utvecklas, sprids och diskuteras i vidare kretsar för att regelmässigt kunna användas i anläggningsprojekt. Ett initiativ har också tagits av SKB för att ta fram ett utbildningsprogram för injekterare och projektörer. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) är huvudman för programmet.

Arbetet med att utveckla injekteringsbruk som uppfyller grundläggande krav och att optimera dessa för användning i fält är centralt för utvecklingen av tätningssystem. Förståelsen för injektering som system behöver fördjupas och SKB fortsätter att driva projekt och deltar i samarbeten för att:

- Kvalificera cementbaserade injekteringsmaterial för tätning av större sprickor och ej cementbaserade material för tätning av mindre sprickor ($< 100 \mu\text{m}$) som ger lakvatten med pH lägre än 11. Detta arbete sker i samarbete med Posiva och Numo och omfattar forskning och utveckling på laboratorium och tester för att kontrollera att det fungerar i fält.
- Undersöka och mäta de mekanismer som styr filtreringsstabiliteten, det vill säga brukets förmåga att passera mindre öppningar utan att bilda pluggar. Egenskapen är väsentlig för inträngningen och därmed också för tätningresultatet. Arbetet som delrapporterats i en licentiatrippart /10-6/ sker som ett doktorandarbete och är samfinansierat med SveBeFo, Elforsk och Cementa.
- Utveckla metoder för att karakterisera berg och förutsäga bruksinträngning. Målet är att vidareutveckla metodiken för karakterisering av berget på ett sådant sätt att den kan användas för att beräkna bruksspridning och bruksåtgång och därmed också för att bestämma lämpligt injekteringsutförande. SKB finansierar bland annat två doktorander för detta arbete som en fortsättning av tidigare doktorsarbeten.

10.1.4 Bergförstärkning

Berganläggningens beständighet under bygg- och driftskedena styrs bland annat av den tekniska livslängden hos anläggningens olika delar. Behovet av bergförstärkning utgör en del av de projekteringsunderlag som tas fram för undermarksdelen. Behovet beror bland annat på bergmassans egenskaper, laster i form av bergsspänningar och geometrin hos utrymmena. Behovet beror också på utrymmenas funktion och tekniska livslängd liksom på underhålls- och miljökrav. De förstärkningsmetoder som i huvudsak kommer att användas är konventionella förstärkningselement såsom bergbultar, sprutbetong och metallnät.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 presenterades ingen beskrivning av metoder för bergförstärkning. SKB:s samarbete med Posiva vilket syftar till att utreda och prova cementbaserade material med lågt pH omnämndes.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Recept för bultsättningsbruk har tagits fram inom ramen för SKB:s pågående forskningsprogram för utveckling och kvalificering av cementbaserade bruk som ger lakvatten med pH lägre än 11. Kiselaska och cement har använts och malts tillsammans med olika metoder. Bruken har ännu inte provats i laboratorium eller under realistiska förhållanden i fält och kontroll av att de uppfyller krav avseende krympning och korrosionsskydd, har inte genomförts. Möjligheten att ta fram konstruktionsbetong bedöms vara god men ytterligare studier och utveckling behövs för att ta fram sprutbetong med lågt pH och god vidhäftning.

I oktober 2003 genomförde SKB en internationell workshop i Stockholm som handlade om kvalificering av cement med lågt pH för användning i geologiska slutförvar. Deltagare från Belgien, Finland, Frankrike, Japan, Spanien, Sverige, Schweiz och Storbritannien presenterade resultat av genomförda studier och framtida planer. Dessutom diskuterades och jämfördes deltagarnas syn på frågeställningar om cementmaterial med lågt pH med avseende på teknik och långsiktig säkerhet. Workshopen gav en god samlad bild av den europeiska forskningsfronten på området.

Livslängdskrav för olika anläggningsdelar under mark har preliminärt ansatts i och med att förutsättningar för projekteringen av djupförvarets undermarksdel har utarbetats /10-7/. Med hänsyn till byggande, deponering och återfyllning har livslängden för deponeringstunnlar ansatts till cirka fem år. Tillfarter, driftutrymmen och transporttunnlar under jord har en betydligt längre livslängd. Livslängden för dessa har ansatts till cirka 100 år, vilket bedöms vara konservativt samtidigt som det möjliggör nyttjande av referenser avseende livslängd som tagits fram för anläggningsbyggande i Sverige.

Tillsynsrutiner som i dag tillämpas för SKB:s undermarksanläggningar (Clab, SFR, Äspö-laboratoriet) bör kunna tillämpas även för djupförvaret, eftersom konstruktionslösningar och materialval troligen blir likartade.

Program

I samarbete med Posiva och Numo pågår studier för att utreda och prova om cementbaserade material med lågt pH kan användas för bergförstärkning i form av bruk runt bultar och sprutbetong.

SKB deltar i ett integrerat projekt inom EU:s sjätte ramprogram för forskning, teknisk utveckling och demonstration (Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs, Esdred) /10-8/ som bland annat omfattar utvecklingen av betong (med lågt pH) som kan användas som sprutbetong för bergförstärkning.

10.2 Buffert

Det buffertmaterial som är aktuellt är svällande bentonitlera.

10.2.1 Krav och förutsättningar

Buffertens viktigaste säkerhetsfunktion är att fördröja transport mellan kapsel och berg varför den ska ha så låg hydraulisk konduktivitet att eventuell transport av korroderande och radionuklider enbart sker genom diffusion. Bufferten ska också filtrera kolloidala partiklar.

Den får vidare inte påverka kapsel och berg negativt och den ska kunna bibehålla sina säkerhetsfunktioner under lång tid.

För att kunna upprätthålla sina säkerhetsfunktioner måste bufferten ha tillräcklig densitet och samverka med återfyllnaden på ett sådant sätt att kapseln alltid omges av buffertmaterial. Bufferten måste också ha sådana egenskaper att mindre berg rörelser kan tas upp utan att kapseln skadas och den måste kunna leda bort värme från kapseln så att temperaturen på kapselytan och i bufferten inte blir för hög.

Kraven på bufferten för KBS-3H, se avsnitt 10.7, är de samma som för KBS-3V. Buffertens detaljutformning kan dock skilja sig till följd av förutsättningarna, till exempel deponeringsmetod och deponeringstunnels diameter.

Dessutom ska bufferten kunna tillverkas, hanteras och deponeras så att påverkan på miljön inte blir oacceptabel och krav på kapacitet och kvalitet kan upprätthållas.

10.2.2 Tillverkningsteknik

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterade SKB att:

- För tillverkning av bentonitblock och ringar finns i huvudsak två metoder att tillgå; enaxlig pressning och isostatisk pressning.
- Block har pressats med både naturlig vattenkvot (10 procent) och förhöjd vattenkvot (17 procent). Bentonitblock och ringar har framställts för experiment vid Äspölaboratoriet. Dessa har tillverkats av natriumbentonit (MX-80) med enaxlig pressning.
- Block och ringar högre än 0,5–1,0 meter kan inte enkelt framställas genom enaxlig pressning. Högre buffertenheter har fördelar vid hantering och inplacering i deponeringshålen.

SKI anser i sin granskning att det är lovvärt att SKB undersöker alternativa tillverkningsmetoder för bentonitblock, eftersom isostatpressande block sannolikt blir mer homogena i strukturen än enaxligt pressade block och ringar och därmed lättare kan uppfylla höga kvalitetskrav.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Block och ringar till nio fullstora deponeringshål har tillverkats av natriumbentonit (MX-80) med enaxlig pressning för användning i Prototypförvaret och Lasgitförsöket vid Äspölaboratoriet. Blocken och ringarna som pressades till Lasgitförsöket hade en mycket hög initial vattenmättnadsgrad, 96–99 procent.

I Sverige finns i dag ingen isostatpress där block och ringar i full skala kan tillverkas. Någon utrustning för isostatpressning av större block och ringar har inte utvecklats under perioden. Tolv bentonitblock i skala 1:4 pressades i en befintlig press hos företaget Ifö Ceramics under 2000 /10-9/. Resultaten visar att tekniken bör vara tillämplig även i en större skala.

I KBS-3-varianten med horisontell deponering, se avsnitt 10.7, är bentonitringarna och -blocken desamma som i referensvarianten, förutom att de är några centimeter tjockare och därmed har en något större diameter.

Program

SKB kommer att utreda tillverkning av bufferten genom isostatisk pressning. Målen med utredningen är att ta fram beskrivning av processer och utrustning för materialhantering, pressning, hantering av pressade block, bearbetning efter pressning och mellanlagring av block och ringar före deponering.

10.3 Deponeringsteknik

Med deponeringsteknik avses den utrustning och de maskiner som erfordras för mottagning, hantering, transport och deponering av kapslar och buffert i djupförvaret.

10.3.1 Krav och förutsättningar

Driften av djupförvarsanläggningen får endast ge begränsad påverkan på bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Utrustning och rutiner för hantering och deponering av använt kärnbränsle ska utformas så att stråldoser till personal begränsas. Utrustningen och rutinerna ska även utformas så att konsekvenser av missöden och avvikelser från det normala mildras. Deponering ska kunna genomföras parallellt med undersökningar, byggande och drift.

10.3.2 Hantering och deponering

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterade SKB att:

- En prototyp av en deponeringsmaskin i full skala har tillverkats för att kunna prova och demonstrera tekniken för deponering av kapslar och buffert i djupförvaret.
- De kringfunktioner som kommer att krävas för transport av transportbehållare från inkapslingsanläggningen ned till förvaringsnivån och överföring av kapseln från transportbehållare till deponeringsmaskinens strålskyddstub har hittills endast studerats översiktligt.

SKI anser i sin granskning av Fud 2001 att om SKB stöter på problem vid åtskild deponering av bentonit och kapsel bör man förbereda sig på att ta fram teknik för samtidig deponering.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Genomförandet av installationerna i Prototypförvaret medförde ett behov av att utveckla utrustning för hantering och deponering av buffert och kapsel i full skala. Detta har inneburit att olika verktyg för hanteringen av block och ringar av pressad bentonit har studerats. Totalt har över 130 buffertenheter hanterats utan missöden i de experiment som genomförts vid Äspölaboratoriet. Dessa erfarenheter kommer att vara till stor nytta i det fortsatta arbetet med att utveckla utrustningen för de buffertenheter som blir aktuella i det framtida djupförvaret.

På motsvarande sätt har deponeringen av de sju kapslarna i Prototypförvaret och Återtagningsförsöket vid Äspölaboratoriet givit värdefulla erfarenheter inför val av slutlig utformning av en deponeringsmaskin.

Dessutom pågår utveckling av deponeringsteknik och maskiner för KBS-3-varianten med horisontell deponering, se avsnitt 10.7.

Program

Utformningen av deponeringsmaskinen bestämmer deponeringstunnlarnas dimensioner. Det är därför viktigt att kunna begränsa maskinens storlek och samtidigt uppfylla de höga krav som ställs när det gäller strålskydd, driftsäkerhet och att risken för missöden är liten i samband med hanteringen av kapslar med använt kärnbränsle. Utrustningen för hantering och inplacering av buffertenheter kommer inte att vara layoutstyrande för deponeringstunnlarna men det gäller att hitta en utformning av utrustningen som ger en säker och rationell hantering. Det fortsatta programmet kommer att delvis genomföras i samarbete med Posiva eftersom de avser att hantera motsvarande kapslar och buffertenheter.

Utredningar av utrustningar kommer att genomföras i steg för att underbygga Layout D1 respektive Layout D2 för undermarksdelen av djupförvaret. Utredningarna ska också ge nödvändigt underlag för framtagning av preliminära driftsäkerhetsrapporter med tillhörande analyser.

Det som för närvarande diskuteras och planeras är:

- Omfattning av strålskydd under deponeringsprocessen, vilket direkt påverkar deponeringsmaskinens storlek.
- Deponeringsmaskin – en konceptuell studie planeras av en hjulburen deponeringsmaskin i stället för den rälsbundna som finns vid Äspölaboratoriet. Studien ska ge svar om genomförbarhet, krav på körbana och tillräcklig noggrannhet för positionering kan uppnås.
- Hantering och inläggning av buffert, vilket kopplar till val av teknik för pressning av buffertenheterna och hur de kommer att transporteras till förvarsnivån. Referensalternativet för transport av buffertenheterna är att de transporteras i rampen till förvarsnivån.
- Demonstration för att verifiera att vald metod och utrustning för hanteringen kommer att fungera i djupförvaret kan komma att behövas.

10.4 Återfyllning och förslutning

Syftet med pågående studier är att utveckla koncept för återfyllning av deponeringstunnlar och av övriga berggrum samt förslutning av djupförvaret.

10.4.1 Krav och förutsättningar

Syftet med att återfylla deponeringstunnlar och övriga berggrum är att bergets barriärfunktioner ska bibehållas. Återfyllningen är därför ingen barriär i sig. Detta medför att följande krav ställs på återfyllningen:

- För att deponeringstunnlarna inte ska utgöra konduktiva vägar som påverkar vattenomsättningen i förvaret ska återfyllningen, över hela tunnelns tvärsnitt och längd, ha en hydraulisk konduktivitet som är jämförbar med den i det omgivande berget, eller som är så låg att vattentransporten domineras av diffusion.
- För att buffertens densitet ska bibehållas ska återfyllningen ha en kompressibilitet som begränsar buffertens expansion uppåt så att buffertens funktion bibehålls.
- Återfyllningen ska vara långsiktigt beständig så att dess funktioner bibehållas i den miljö som förväntas i djupförvaret.
- Teknisk och ekonomisk genomförbarhet.

Vidare får återfyllda deponeringstunnlar inte ha negativ påverkan på barriärerna i förvaret. Material och återfyllningsteknik ska väljas så att de inte medför oacceptabel påverkan på miljön.

10.4.2 Material och kompakteringsteknik

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Olika material och teknik för återfyllning av tunnlar, berggrum och schakt i ett djupförvar har övervägts i SKB:s utvecklingsarbete genom åren, bland annat har bentonit och krossat berg, bentonit och kvartssand eller enbart krossat berg undersökts. SKB utvecklar och provar packningsteknik och material för återfyllning. Vid Äspölaboratoriet har fullstora tunnlar återfyllts med en blandning av bentonit och krossat berg i experimenten Återfyllning och pluggning och Prototypförvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Det finns skäl att ytterligare utreda och utveckla koncept för återfyllning av tunnlar bland annat för att säkerställa återfyllningens funktion även om grundvattnet har hög salthalt på förvarsdjup, tillgodose behovet av återfyllningskoncept för övriga berggrum samt utveckla teknik för att återfylla med tillräcklig effektivitet.

SKB har i samarbete med Posiva, inom ramen för ett pågående forskningsprogram, genomfört teoretiska studier för att identifiera återfyllnadskoncept som bedöms kunna uppfylla krav på såväl deponeringstunnlar som övriga bergrum. Studierna omfattar följande material: bentonit, andra svällande leror, icke svällande lera, krossat berg och morän, se avsnitt 18.1.6. Två olika återfyllnadsmetoder har studerats för de olika materialen, kompaktering i tunneln respektive inläggning av förkompakterade block.

Program

SKB och Posiva kommer att fortsätta det pågående forskningsprogrammet och tre återfyllningskoncept kommer att utredas ytterligare /10-10/. De tre koncepten är:

- En blandning av bentonit och bergkross kompakteras i tunneln.
- Svällande lera kompakteras i tunneln.
- Förkompakterade block läggs in i tunneln.

Forskningsprogrammet omfattar totalt fyra steg. Det första steget är genomfört och omfattade tekniska utredningar för att beskriva vilka förutsättningar de föreslagna återfyllnadskoncepten har att möta SKB:s krav.

I det andra steget kommer geotekniska laboratorietester samt en djupare analys av de tre koncepten att göras. Under detta steg planeras tillverkning av förkompakterade block med önskade egenskaper med avseende på bland annat densitet och hanterbarhet. Pressning av block av svällande lera respektive en blandning av bentonit och krossat berg kommer att genomföras i laboratorieskala (50 mm). Dessutom kommer den redan framtagna tekniken för in-situ kompaktering med vibrationsplattor /10-11/ att optimeras med avseende på bland annat inpackningsteknik och materialegenskaper så som till exempel kornstorlek.

I det tredje steget kommer betydelsen av uppskalning att utredas. Detta innebär teknikutveckling samt tester för att verifiera att återfyllnadskoncepten är tekniskt genomförbara. Testerna kommer att genomföras med en prototyputrustning. Steg fyra avser tester i full skala för att verifiera återfyllnadens funktion.

10.4.3 Förslutning

När alla kapslar i en deponeringstunnel har deponerats återfylls denna och försluts i avvaktan på att alla utrymmen i undermarksdelen återfylls. Driftförslutningen förutses bestå av en betongplugg i mynningen av varje deponeringstunnel. Förslutningen dimensioneras för att klara vattentrycket på förvarsdjup och svälltrycket i återfyllningen. Driftförslutningarna har ingen långsiktig funktion men kommer att lämnas kvar när övriga bergrum återfylls.

Behovet av permanenta förslutningar i undermarksdelen, mellan till exempel olika deponeringsområden, kommer att utredas i platsspecifika preliminära säkerhetsbedömningar under 2005. Denna typ av förslutningar förutses vara någon form av bentonitpluggar med en långsiktig beständighet. Funktionkrav och detaljerade tekniska lösningar för denna typ av pluggar kommer att utarbetas senare.

En tredje typ av förslutning avser att förhindra eller försvåra intrång i undermarksanläggningen sedan den återfyllts och förslutits. SKB bedömer att detaljerade tekniska lösningar för detta kan anstå.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB:s bedömning i Fud 2001 var att tillräckliga kunskaper kommer att finnas beträffande utformning och konstruktion av driftförslutningar när planerade experiment är genomförda. Driftförslutning i form av pluggar ingår i fullskaleexperimenten Återfyllning och pluggning respektive Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Driftförslutningar i deponeringstunnlarna kan utformas på olika sätt. Den typ av plugg som installerats i experimenten Återfyllning och pluggning respektive Prototypförvaret är en armerad plugg som förankras i en slits i berget runt tunneln. En annan typ är en så kallad friktionsplugg vilken hålls på plats av friktionen mellan bergvägg och plugg.

Utformningen av de två armerade pluggar som installerats i Prototypförvaret skiljer sig delvis från pluggen i experimentet Återfyllning och pluggning genom att de saknar en tätande ring av bentonit och de har gjutits med från leverantören certifierad självkompakterande betong. Friktionspluggar har hittills inte testats i Äspölaboratoriet.

Program

Att upprätta funktionskrav, tekniska lösningar och metod för utförandet av pluggar ingår som en del i det utvecklingsprogram som SKB driver avseende återfyllning och förslutning av djupförvaret. I en avslutad förstudie inom ramen för detta program kunde man konstatera att det finns ett behov av att genomföra en inventering och utvärdering av möjliga koncept för förslutningar, både driftförslutningar och förslutningar med långsiktig funktion. Valet av koncept för förslutningar beror av bland annat vilken metod som används för uttag av berget och vilket återfyllningskoncept som används.

SKB deltar i ett integrerat projekt inom EU:s sjätte ramprogram för forskning, teknisk utveckling och demonstration (Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs, Esdred) /10-8/. En del av projektet behandlar utveckling och validering av teknologi för utveckling av temporära förslutningar tillverkade av cementmaterial med lågt pH. Till exempel omfattar programmet applicering och kvalificering av driftförslutning tillverkad av sprutbetong med lågt pH.

En teknisk lösning för förslutning av horisontella deponeringstunnlar kommer att utarbetas inför den demonstration av KBS-3H, med horisontell deponering av kapslarna, som planeras vid Äspölaboratoriet under 2006. Åtminstone en av deponeringstunnlarna, kommer enligt nuvarande planer, att förslutas med en friktionsplugg tillverkad av sprutbetong baserad på cement med lågt pH. KBS-3H-metoden beskrivs närmare i avsnitt 10.7.

10.5 Förslutning av undersökningshål

10.5.1 Krav och förutsättningar

Berguttag och drift av djupförvarsanläggningens undermarksdel ska endast ge begränsad påverkan på bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Undersökningshål från ytan och från tunnlar i djupförvaret måste därför rensas och tätas, senast i samband med förslutning av djupförvaret.

10.5.2 Teknik för tätning av borrhål

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Teknik för tätning av borrhål har tidigare utvecklats och provats inom ramen för bland annat Stripaprojektet /10-12/ och tillämpats för borrhål i havsbotten vid SFR. Två olika tekniker har använts för att föra in högkompakterade bentonitblock i borrhål med en längd av upp till 200 meter. En annan tätningsteknik har provats av Nagra och går ut på att blåsa in bentonit-pellets med slang.

SKI påpekar i sin granskning att det inte helt kan uteslutas att någon borrhålsförslutning misslyckas eller att framtida händelser kan öppna upp flödesvägar i gamla borrhålslägen. SKI anser att någon form av respektavstånd mellan borrhål och deponeringshål behövs.

SKB utvecklar koncept för tätning av borrhål och hanterar frågan om avstånd mellan borrhål och deponeringshål i säkerhetsanalys och projektering.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ett program för att identifiera och demonstrera bästa tillgängliga teknik för att rensa och täta undersökningshål genomförs av SKB och Posiva i samarbete. Programmets första etapp, som avslutats under 2003, omfattar en förstudie i vilken tillgängliga tekniker för tätning av långa borrhål identifierats. I förstudien har lera lyfts fram som ett lämpligt material för tätning av större delen av ett borrhål. Övre delen, om hålet borras från ytan, måste tätas så att erosion, glaciation och sabotage inte innebär att tätningens funktion i hålets djupare delar försämras. Två koncept för att applicera lerpluggar i borrhål har identifierats vilka bör utredas vidare; tätning med förkompakterade block respektive kompakterade pellets.

Program

Ytterligare etapper av det påbörjade forskningsprogrammet kommer att genomföras under kommande Fud-period. Inledningsvis kommer etapp två att genomföras vilken omfattar:

- Framtagning av funktionskrav.
- Sammanställning av ett komplett koncept för förslutning av undersökningshål.
- Laboratoriestudier av potentiella material samt kombinationer av olika material.
- Rensning av de borrhål som ska användas i fullskaliga tester av material och utrustning i fält.
- Planering av och förberedelser för fälttester.

Program för efterföljande etapper kommer att preciseras när erfarenheter från de inledande etapperna finns framme.

10.6 Återtag

Hur ett återtag av deponerade kapslar ska gå till beror på när det sker i tiden. Ju längre tid som gått efter deponeringen av en kapsel, desto större insats krävs. Om det beslutas att återta kapseln direkt efter deponeringen och deponeringstunneln inte är återfylld kan återtag ske med samma maskin som användes vid deponeringen. Är deponeringstunneln däremot återfylld och försluten ökar givetvis arbetsinsatsen. Om återtag sker flera år efter deponeringen och bentoniten nått fullt svälltryck blir insatsen ännu mera omfattande bland annat på grund av att deformationer kan medföra risk för fallande bergblock vid borttagning av återfyllningen. Vidare måste kapseln frigöras från bufferten innan den kan lyftas upp ur deponeringshålet.

10.6.1 Krav och förutsättningar

I Sverige finns inget formellt krav på att återtag av deponerad kapsel ska vara möjligt, och för att ett återtag ska kunna genomföras krävs tillstånd från myndigheterna. Att återtag inte ska vara omöjligt, är en logisk följd av den stegvisa utbyggnad med mellanliggande utvärdering som planeras. Konstruktionskraven innebär att återtag av deponerade kapslar ska vara möjligt och att eventuella åtgärder som genomförs för att underlätta återtag inte får påverka djupförvarets säkerhetsfunktioner.

10.6.2 Friläggning av kapsel

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Ett antal metoder för att avlägsna bentonit har studerats. De kan indelas i fyra huvudkategorier: mekaniska, hydrodynamiska, termiska och elektrotekniska metoder. Den hydrodynamiska metoden har uppvisat de bästa resultaten och metoden har rekommenderats för vidare utredning.



Figur 10-4. Fotot till vänster visar försöksuppställningen som användes vid uppslammningsförsöket – uppslamning sker i tanken i mitten. Till höger visas hur bentonitleran slammas upp med hjälp av en saltlösning.

I Fud 2001 konstaterade SKB att teknik och metoder för återtag samt anläggning för mellanlagring av bränslet måste finnas tillgängliga om man vid utvärderingen av den inledande driften av djupförvaret finner det nödvändigt att återta deponerade kapslar.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

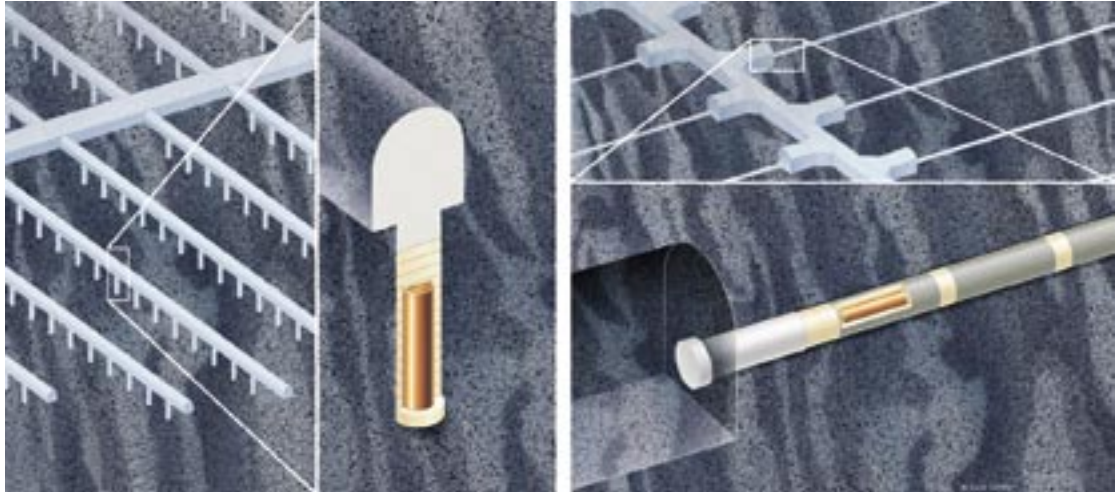
Friläggning av en fullstor kapsel, omgiven av en ej vattenmättad bentonit, har demonstrerats vid Äspölaboratoriet. Syftet med försöket, som genomfördes med en provisorisk utrustning, var att klarlägga om friläggning av kapslar är möjlig genom uppslamning av bufferten med saltlösning och avvattning med en dekanter i en kontinuerlig process /10-13/, se figur 10-4. Försöken bekräftar att den använda hydrodynamiska metoden är en metod som SKB även fortsättningsvis bör utveckla och testa.

Program

Ytterligare demonstrationer av teknik och utrustning för friläggning av en deponerad kapsel kommer att genomföras vid rivningen av Återtagsförsöket och Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet. Dessa demonstrationer kommer att omfatta endast delar av bufferten eftersom buffertmaterialet kommer att användas och undersökas också inom ramen för andra studier.

10.7 KBS-3 med horisontell deponering

KBS-3-metoden baseras på flerbarriärprincipen. Möjligheten att modifiera referensmetoden och deponera kapslarna liggande i rad i långa horisontella deponeringstunnlar i stället för vertikalt i deponeringshål med en kapsel i varje har diskuterats sedan tidigt 1990-tal /10-14 till 10-17/. Ovanmarksdelen, tillfarter och centralområde under mark kan utformas oberoende av hur själva deponeringsområdet ser ut. Den principiella skillnaden mellan referensmetoden (KBS-3V) och ett KBS-3-förvar med horisontell deponering (KBS-3H) visas i figur 10-5. I båda varianterna är kapsel och buffert desamma.



Figur 10-5. Principiell skillnad mellan referensmetoden KBS-3V (vänster) och KBS-3H (höger).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 beskrev SKB det påbörjade arbetet med att ta fram ett forsknings-, utvecklings-, och demonstrationsprogram för KBS-3H, som då benämndes medellånga hål.

I sin granskning av Fud 2001 påpekade SKI att det är tillfredsställande att SKB redovisar ett alternativ med horisontell deponering, men att beslut om till exempel horisontell deponering etc kan behöva fattas relativt snart. Vidare konstaterar SKI att en demonstration av tekniken för horisontell deponering erfordras.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Under 2001 publicerade SKB ett forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering /10-18/. Programmet, som genomförs stegvis i samarbete med Posiva under åren 2002–2010, omfattar förstudie, konceptuell utformning, tillverkning av utrustning, demonstration och fälttester vid Äspölaboratoriet samt en utvärdering. Programmet har i största möjliga utsträckning anpassats till SKB:s referenstidsplan för djupförvaret.

Förstudien, som genomfördes under 2002, behandlade i huvudsak tekniska frågor som teknik för berguttag, hanteringsutrustning för deponering och utformning av en deponeringscontainer. Studien visade att konceptet är tekniskt genomförbart. Arbetet med att ta fram en konceptuell utformning genomfördes under 2003. Syftet med denna fas av projektet var bland annat att identifiera kritiska punkter med avseende på den långsiktiga säkerheten i programmet. Arbetet har omfattat tre områden; teknisk utveckling, förberedelser för en demonstration och inledande studier av konceptets långsiktiga säkerhet. De horisontella deponeringstunnlarna planeras vara upp till 300 meter långa och ha en diameter på 1,85 meter, vilket är en ökning med tio centimeter i jämförelse med deponeringshålen i KBS-3V. Kraven är stora på att deponeringstunnlarna är raka och uppfyller snäva toleranser för dimensionerna så att deponeringen inte försvåras. I förstudien förordades att berguttag med så kallad klusterteknik utreds vidare. En utrustning för borrar av deponeringstunnlarna med denna teknik har utvecklats och testats, se avsnitt 10.1. Kopparkapseln och bufferten kommer att placeras i en deponeringscontainer av stål och hela paketet, som väger cirka 50 ton, deponeras i den horisontella deponeringstunneln. Mellan de deponerade paketen placeras ett distansblock av bentonit.

Utveckling av deponeringsteknik och maskiner för detta pågår. Enligt planerna kommer den fjärrstyrda deponeringsmaskinen att utnyttja vattendrivna kuddar för att minska friktionen under transporten längs deponeringstunneln. Studier av bentonitens funktion visade att cirka 60 procent av deponeringscontainerns yta ska vara perforerad för att bentoniten ska svälla ut och täta deponeringstunneln. Distansblockens funktion när det gäller att täta och förhindra erosion av bentonitbufferten har studerats i laborieförsök i olika skalor. Försöken visar att en risk för erosion och kanalbildning föreligger om den hydrauliska gradienten är stor så utredning av dessa frågor fortsätter, se avsnitt 17.2.19. En plats, på 220 meters djup, i Äspölaboratoriet har valts för att demonstrera konceptet i full skala. Förberedelserna för demonstrationen påbörjades under sommaren 2003, då en nisch sprängdes ut och tre kärnborrhål borrades för att karakterisera berget.

Den genomförda säkerhetsbedömningen av det föreslagna konceptet har granskats av externa experter från Enresa, Nagra och Numo. Slutsatsen av granskningen var att konceptet bedöms vara tekniskt genomförbart samt att den långsiktiga säkerheten uppfyller kraven. Därmed utgör KBS-3H ett alternativ till referensmetoden.

Program

Återstående punkter i forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogrammet för KBS-3H kommer huvudsakligen att genomföras under perioden 2005–2007 i samarbete med Posiva och inom ramen för EU:s 6:e ramprogram och projektet Esdred /10-8/. De huvudsakliga steg som återstår är tillverkning av erforderlig utrustning och demonstration av denna vid Äspölaboratoriet, genomförande av en säkerhetsanalys samt utvärdering.

De huvudsakliga tekniska aktiviteter som planeras under perioden 2004–2007 är:

- Borrning av två deponeringstunnlar i Äspölaboratoriet.
- Detaljkonstruktion och tillverkning av deponeringsutrustning.
- Demonstration av deponeringsutrustning i Äspölaboratoriet.
- Genomförande av förstudie samt ”basic design” av utrustning för återtag.

Eventuellt kommer projektet att kompletteras med ett fullskaleförsök vid Äspölaboratoriet för att verifiera bentonitens funktion under den inledande vattenmättnadsfasen. Under 2004 fattas ett beslut om detta. Fältförsöket inleds i så fall under 2006.

En säkerhetsanalys för KBS-3H baserad på platsdata från Olkiluoto i Finland ska genomföras av Posiva (avsnitt 14.1). Denna föregås bland annat av utredningar och forskning kring kritiska frågor, modellering, upprättande av en processrapport samt analyser av radionuklidtransport. Exempel på frågor är utsvällning av bentoniten genom den perforerade deponeringscontainern (avsnitt 17.2.7), tryckuppbyggnad till följd av korrosion av deponeringscontainern (avsnitt 17.2.10) och kanalbildning (piping) och erosion av bentoniten (avsnitt 17.2.19).

Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogrammet avslutas med en utvärdering av konceptet och rapportering under 2007.

11 Djupförvar – projektering

Projektering är en samlingsterm för de aktiviteter där tekniskt underlag samlas, bearbetas och analyseras för att sedan omsättas till de funktionsbeskrivningar, konstruktionsritningar, beskrivningar av tekniska system, drift- och underhållsinstruktioner etc som erfordras för att djupförvaret ska kunna byggas, drivas, förslutas och slutligen avvecklas.

Målet med projekteringen är att utforma djupförvaret, med tillhörande infrastruktur och verksamheter, så att de krav som ställs uppfylls. Djupförvarsanläggningen beskrivs översiktligt i anläggningsbeskrivningar. Dessa redovisar utformning och inplacering av ovanmarks- och undermarksdelen samt samordningen mellan dessa. Redovisning görs även av de fordon, maskiner etc som behövs i anläggningen, inklusive tekniska system och installationer som krävs för bygge och drift. Anläggningsbeskrivningar är viktiga underlag för planeringen av byggskedet, driftsäkerhetsanalys, systemanalys, säkerhetsanalys samt miljökonsekvensbeskrivning (MKB). De anläggningsbeskrivningar som tas fram efter de inledande platsundersökningarna kommer att utgöra underlag för ansökan om tillstånd för djupförvarsanläggningen enligt miljöbalken och kärntekniklagen. Framtagning av huvud- och konstruktionshandlingar påbörjas under ansökningstiden och kommer sedan att fortsätta under byggskedet.

11.1 Metodik för projektering

Metodiken för projekteringen av djupförvarsanläggningens två delar, ovanmarksdelen och undermarksdelen, skiljer sig åt. Ovanmarksdelen utgör i stort sett en konventionell industrietablering och kommer att följa de normer och föreskrifter för byggnader, mekaniska och elektriska konstruktioner som finns. Djupförvarsanläggningen utgör dessutom en kärnteknisk anläggning, vilket kommer att beaktas när de konstruktionsstyrande dokumenten för de tekniska systemen tas fram samt vid utformningen av till exempel det särskilda tillträdesskyddet till anläggningens undermarksdel.

För utformningen av undermarksdelens bergtrum finns inte motsvarande normer och föreskrifter. SKB har därför utarbetat ett dokument som benämns ”Djupförvar, Projekteringsföresättningar Berg (PFBerg)” /11-1/. Detta dokument beskriver metodiken för projekteringen och omfattar beskrivningar av och/eller referenser till:

- Det underlag projekteringen ska bygga på, konstruktionsföresättningar.
- Hur projekteringen ska utföras.
- Hur projekteringsresultat ska verifieras.
- Hur projekteringsresultat ska dokumenteras.

I PFBerg anges också vilka av bergtrumsprojekteringsdelresultat som ska kontrolleras och värderas av beställaren för att arbetet ska kunna fortsätta. Till PFBerg hör ett antal anvisningar för olika delar av projekteringsarbetet. Anvisningarna utvecklar eller förklarar projekteringskrav och anger lämpligt tillvägagångssätt för olika projekteringsmoment.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Metodiken för projekteringen av undermarksdelen har utvecklats efter publiceringen av Fud 2001 och därför finns det inte några specifika slutsatser eller granskningskommentarer.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Under 2003 har projekteringsmetodikerna för undermarksdelen, som presenterats ovan, använts i ett pilotprojekt som tillämpat platsundersökningens underlag för platsmodellversion 1.1 i Forsmark /11-2/ för att utforma undermarksdelens layout. Genom att tillämpa metodiken har förslag på förändringar och förbättringar av platsmodellen avseende prioriterad information, redovisning av tolkade data samt definition av verifierbara kriterier framkommit. Vidare har metodiken kunnat förbättras bland annat med avseende på målstyrningen, spårbarheten mot övergripande konstruktionsförutsättningar, och användning av tidig och generell information.

Program

Metodikerna för projektering av undermarksdelen som har använts och vidareutvecklats i ett pilotprojekt kommer att tillämpas i projekteringen under platsundersökningsskedet.

11.2 Förutsättningar

Projekteringen av anläggningen ska samordnas med platsundersökningar, MKB, säkerhets- och systemanalyser samt med den tekniska utvecklingen. En förutsättning för att projektering, och i ett senare skede bygge, drift, förslutning och avveckling, ska kunna genomföras med tillfredsställande resultat är därför att etablera rutiner för hur:

- Konstruktionsförutsättningar ska uppfyllas.
- Projektering – och senare bygge, drift, förslutning och avveckling – ska styras.
- Resultat ska styras och kontrolleras.
- Resultat ska dokumenteras.

11.2.1 Konstruktionsförutsättningar

Konstruktionsförutsättningar utgör en nödvändig grund för projektering och byggande. Konstruktionsförutsättningar kan delas in i krav samt i tekniska och naturliga förhållanden och egenskaper som styr utformningen. Kraven uttrycker villkor som ställts för att uppföra och godta djupförvaret. De tekniska och naturliga förhållandena och egenskaperna, vilka benämns restriktioner, ger övriga förutsättningar för utformningen. Konstruktionsförutsättningar kommer att utarbetas för djupförvarsanläggningens olika områden som berg, byggnader, fordon, maskiner och tekniska system.

Kraven kan brytas ned i intressentkrav, systemkrav (delsystemkrav) och utformningskrav:

- Intressentkrav utgörs av olika intressenters uttalanden om vad anläggningen ska åstadkomma och vilka kapaciteter den ska ha.
- Systemkrav uttrycker vad anläggningen ska göra, eller vilka funktioner, förmågor, egenskaper eller kvaliteter den ska ha för att uppfylla intressentkraven.
- Utformningskrav uttrycker hur anläggningen ska utformas för att uppfylla systemkraven, med hänsyn till rådande tekniska och naturliga förhållanden och egenskaper.

De tekniska och naturliga förhållanden och egenskaper som styr utformningen av undermarksdelen (bergrumsprojekteringen) är:

- Det använda kärnbränslet – mängd bränsle och bränslets egenskaper.
- Platsen – så som den beskrivs generiskt eller i platsbeskrivningar.
- Anläggningen – gränssnitt mellan olika delar, tekniska system och så vidare samt verksamheter den ska rymma.

- Processer i förvarets utveckling – de processer som påverkar djupförvarets säkerhetsfunktioner och deras långsiktiga utveckling.

Det använda kärnbränslet och dess egenskaper beskrivs i den information om bränslet som finns där det för närvarande lagras, det vill säga i Clab. De bränslemängder det svenska kärnkraftsprogrammet förväntas generera uppskattas årligen och rapporteras /11-3/.

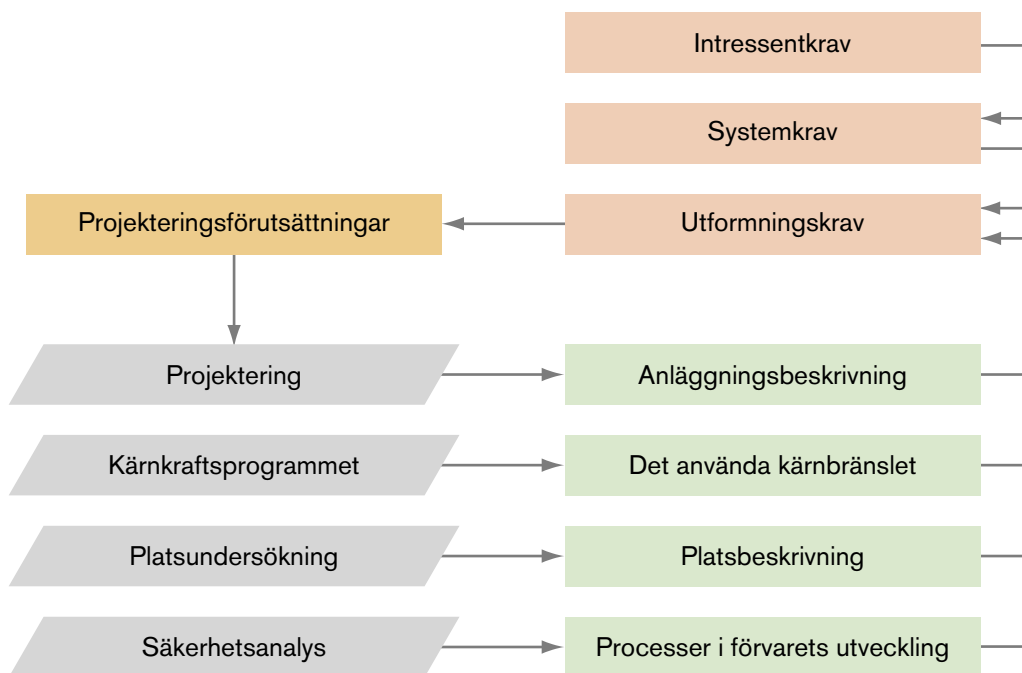
Platsbeskrivningar tas för närvarande fram inom platsundersökningsprojektet. Det är projekteringens uppgift att anpassa anläggningen till den information om platsen som kommit fram. Projektering ska också lämna önskemål om hur fortsatta platsundersökningar ska genomföras med hänsyn till projekteringens behov.

Den del av konstruktionsförutsättningarna som består av tolkade platsdata uppdateras successivt. Projekteringen av undermarksdelen består till stora delar av att anpassa anläggningsutformningen till den nya informationen om berget, till exempel mekaniska, hydrauliska, kemiska och termiska egenskaper.

Anläggningen ska utformas med hänsyn till flexibilitet och teknisk utveckling under den långa tidsperiod som omfattar bygge, drift samt förslutning och så att anläggningen kan uppfylla säkerhets- och kapacitetskrav på de verksamheter den ska rymma. Anläggningen ska också utformas med hänsyn till tekniska risker och kostnader i bygg- och driftskedet. Utredningar av vilka tekniska lösningar som är mest fördelaktiga från bland annat säkerhets-, miljö-, prestanda- och ekonomisk synpunkt kommer att genomföras och rapporteras separat.

Processer i förvarets utveckling sammanställs inför varje säkerhetsanalys. De omfattar alla processer som påverkar förvarets långsiktiga utveckling. De processer som påverkar förvarets utformningskrav påverkar i många fall till exempel dimensionerande laster.

Figur 11-1 visar kopplingarna mellan intressent-, system- och utformningskrav samt hur krav och naturliga och tekniska förhållanden som styr projekteringen hänger samman. Figuren visar också de aktiviteter genom vilka konstruktionsförutsättningarna uppdateras.



Figur 11-1. Samband mellan krav, förutsättningar och egenskaper och hur de påverkar varandra. Figuren visar också de aktiviteter genom vilka konstruktionsförutsättningarna uppdateras.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inför den projektering och konstruktion av djupförvarsanläggningen som påbörjades när platsundersökningar inleddes, identifierades ett behov av att sammanställa befintliga konstruktionsförutsättningar i ett samlat dokument. I Fud 2001 presenterades det påbörjade arbetet med att sammanställa och strukturera konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret.

SKI påpekar i sin granskning av Fud 2001 att de för slutförvaret ännu ej fastlagda funktionskraven ska kunna uppfyllas senast vid tillståndsansökan enligt kärntekniklagen. Det är då nödvändigt att variationsbredd och viss handlingsfrihet ingår i tillståndet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

SKB publicerade övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet under 2002 /11-4/. Syftet med dokumentet var att sammanställa befintligt konstruktionsunderlag i ett dokument och på så sätt redovisa kravbilden för djupförvarets långsiktiga säkerhet på en övergripande nivå. Tanken var att projekteringsledningen skulle kunna använda dokumentet för att kontrollera att övergripande krav följs upp i projektering och konstruktion. Ett annat syfte var att myndigheter och andra intressenter skulle kunna använda dokumentet för att följa upp hur krav de ställt omsätts i den faktiska utformningen av djupförvarsanläggningen.

I arbetet med att sammanställa de övergripande konstruktionsförutsättningarna konstaterades att dessa behövde en genomgripande och grundlig granskning och att denna med fördel kunde ske då projektörer och konstruktörer började använda de övergripande konstruktionsförutsättningarna i sitt arbete. Det konstaterades också att informationen, på grund av de många kopplingarna och beroendena, var otillgänglig och svår att uppdatera i rapportform och att den borde överföras till databasformat.

Tillgängliga programvaror för kravhantering har inventerats, och ett verktyg har köpts in för test och utvärdering. Metodik och erfarenheter från systematisk kravhantering har inhämtats bland annat genom samarbete med Posiva inom KBS-3H-projektet /11-5/. Granskning och kontroll av kravens innehåll genomförs parallellt med att metodiken för projektering av djupförvarets undermarksdel utvecklas. Arbetet syftar till att kontrollera att övergripande krav följs upp i projekteringen, att identifiera vilka krav som ska verifieras inom projektering och vilka som ska verifieras i andra sammanhang, att formulera kraven så de blir entydiga och lätta att förstå och att identifiera eventuella intressekonflikter och hantera dem.

Program

De övergripande konstruktionsförutsättningarna som rapporterades 2002 /11-4/ ska uppdateras och överföras i databasformat. Detta arbete har inletts, bland annat i samband med utarbetandet av dokumentet "Djupförvar Projekteringsförutsättningar Berg (PFBerg)" /11-1/. Arbetet ska resultera i en uppdaterad version av de övergripande konstruktionsförutsättningarna samt en utvärdering av arbetssätt och databasverktyg. PFBerg tillämpas praktisk under projekteringen av undermarksdelen i projekteringssteg D1. I nästa steg ska underlaget användas för projekteringen av undermarksdelen i D2.

11.2.2 Styrning och kontroll

För projekteringen behövs en väl definierad beslutsgång som fastställs i rutiner och planer för att granska och godkänna olika typer av handlingar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Rutiner för styrning och kontroll presenterades inte i Fud 2001.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Rutiner och planer som fastställer följande behövs:

- Vilket underlag och vilka av projekterings resultat som måste godkännas innan beslut om fortsatt projektering kan fattas.
- Hur och av vem underlag och resultat ska granskas och kontrolleras inför beslut.
- Vem/vilka som är ansvariga för olika typer av beslut, vem/vilka som ska vara delaktiga i beslut och vem/vilka som ska delges beslut.
- De möten, samråd med mera som måste genomföras inför olika typer av beslut.

Program

Arbetet med att beskriva tillämpningen av SKB:s ledningssystem och projektmodell i projekteringsarbetet, med hänsyn till projekterings specifika behov och vald organisation pågår och kommer att fortsätta under Fud-perioden. Syftet är att projekteringen ska kunna drivas med tydliga gränssnitt, effektivitet och spårbarhet.

11.2.3 Dokumentation

Djupförvarsprojektet kommer att pågå under en lång tid och många människor kommer att vara involverade i arbetet med att projektera, granska, utvärdera, bygga, driva, och slutligen avveckla anläggningen. Det är viktigt att all information av betydelse för projektets resultat dokumenteras och bevaras.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Rutiner för spårbarhet i och dokumentation av djupförvarsprojektet presenterades inte i Fud 2001.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

För att uppnå spårbarhet i arbetet måste alla de förutsättningar, resultat, protokoll och beslut som för projekteringen framåt dokumenteras. För detta krävs rutiner för att överföra och lagra informationen. Detta kan stödjas av ett digitalt ritnings- och dokumenthanteringssystem.

Förutom att bevara information och göra den spårbar ska ett system för ritnings- och dokumenthantering kunna hantera nödvändigt informationsflöde. Systemet ska också ha giltighets- och versionshantering, vilket innebär att det ska kunna förse alla inblandade med korrekta och aktuella versioner av informationen. Informationen måste levereras i ett format som kan tillämpas av användaren.

Det som är speciellt för djupförvarsprojektet är den långa tidsaspekten. Vid val av system för ritnings- och dokumenthantering kommer detta att beaktas genom att data bevaras på ett sådant sätt att de på ett effektivt sätt kan föras in i framtida system.

Program

Arbetet med att ta fram och etablera ett system för dokumentation kommer att pågå under kommande Fud-period.

11.3 Genomförande – stegvis projektering

Lokalisering, bygge och drift av djupförvarsanläggningen har delats in i skeden; förstudieskedet, platsundersökningsskedet, byggskedet och driftskedet med inledande och reguljär drift samt avveckling. Projektering ska i olika skeden av djupförvarsprojektet leverera de handlingar som krävs för att beslut inför nästa skede ska kunna fattas.

Projekteringen av djupförvarsanläggningen sker stegvis. Den redovisning som följer fokuserar huvudsakligen på projekteringen av undermarksdelen. Inför varje nytt steg i projekteringen av undermarksdelen uppdateras metodik och förutsättningar utifrån genomförandet av föregående steg. På så sätt beslutas och detaljeras undermarksdelens utformning successivt i takt med att undersökningar av berget och säkerhetsanalys ger ny information, teknik utvecklas och anläggningen gradvis byggs ut. Den stegvisa informationsinhämtningen, beslutsgången, detaljeringsgraden och utbyggnaden medför att handlingsutrymmet för förändringar begränsas alltmer.

I förstudieskedet utarbetades alternativa ej platsanpassade anläggningsbeskrivningar baserade på alternativa layouter benämnda E. Dessa layouter syftade dels till att ge en tydlig bild av vad byggandet av djupförvarsanläggningen innebär och dels till att utgöra underlag för att studera vilken/vilka av de alternativa layouterna som är att föredra från säkerhets-, miljö- och effektivitetssynpunkt. Layoutklass E utgör underlag för efterföljande projekteringssteg D.

Projekteringssteg D påbörjades i samband med att platsundersökningsskedet inleddes under 2002 och syftar till att utgöra underlag för ansökan om inkapslingsanläggningen respektive djupförvaret och för att gå vidare in i byggskedet. I detta steg fasställs inplaceringen av anläggningens ovanmarksdel samt utformningen och inplaceringen av tillfartsvägar. Beslut om layout för en del av anläggningen innebär att utformning helt eller i hög grad också fastställs för tekniska system och installationer som finns i anläggningsdelen. Detta innebär att möjliga framtida förändringar begränsas.

Projekteringen fortsätter under byggskedet med att huvudhandlingar tas fram för beslutade delar av djupförvaret. Baserat på konstruktionshandlingarna, nya platsdata, information från säkerhetsanalys och MKB samt teknikutveckling uppdateras metodik och förutsättningar. Projekteringen i byggskedet fortsätter sedan med att definitiv layout och bygghandlingar tas fram för de byggnader och utrymmen som krävs för inledande drift.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB:s stegvisa projekteringsmodell för djupförvaret har beskrivits i Fud 98 och Fud 2001. Förvarets utformning förfinas och dokumenteras stegvis i takt med att ökad kunskap erhålls och att djupförvaret successivt projekteras och styrande layoutfrågor bearbetas. Den stegvisa detaljeringen ger en successiv begränsning av handlingsutrymmet för förändringar. Det konstaterades att de delar som byggs tidigt bör utformas så att rimlig handlingsfrihet bibehålls för utformningen av delar som byggs senare.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

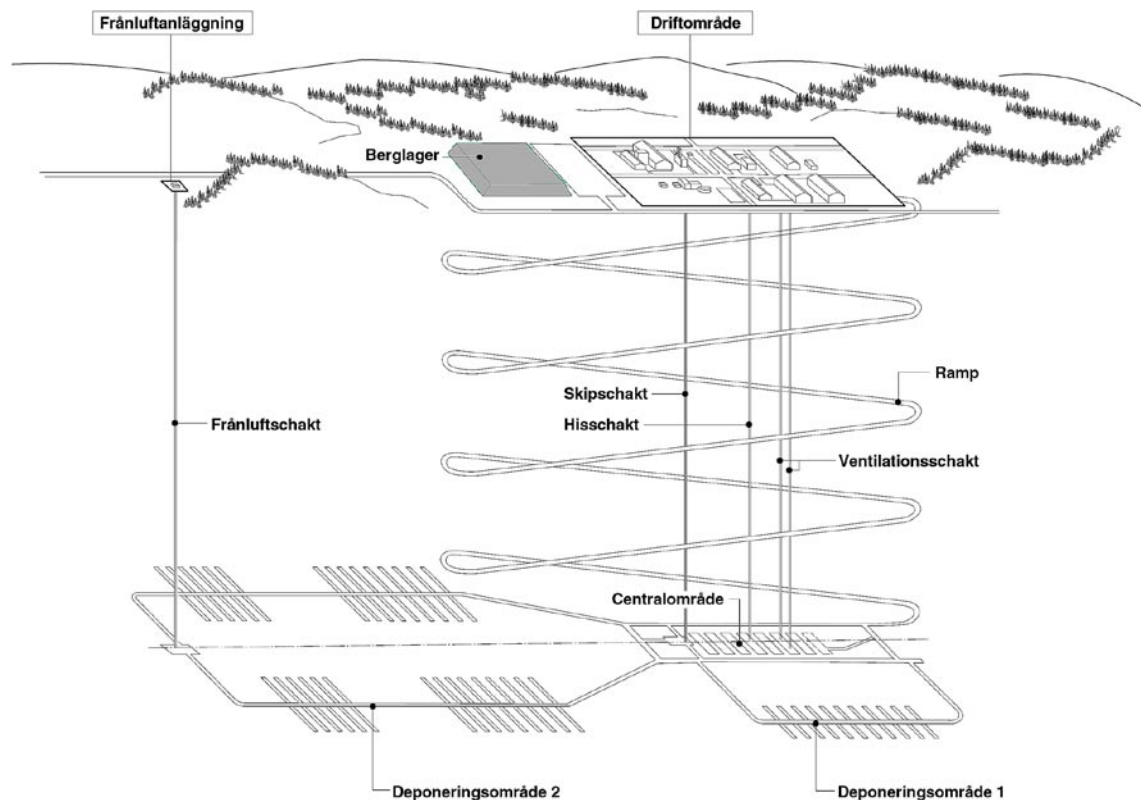
En metodik för hur projekteringsstegen ska genomföras har utarbetats och sambanden mellan dokumentationen i varje projekteringssteg har fastställts. Sambanden omfattar återkopplingar från projekteringsarbetet och utarbetade layouter till platsundersökningarna och olika versioner av platsmodellerna samt till säkerhetsanalys och MKB. Metodiken föreskriver också hur uppskattning av osäkerheter i tidig information och i tidiga funktionslösningar ska kunna göras.

Under det inledande steget E, som avslutades 2002, genomfördes en samlad men ej platsanpassad projektering av djupförvarsanläggningens ovan- och undermarksdel och en referensutformning för dessa togs fram. En anläggningsbeskrivning, Layout E, med ritningar som redovisar anläggningens funktion, storlek och omfattning har upprättats.

Anläggningsbeskrivningen har givits ut i tre versioner med alternativa tillfarter: Rak ramp med två driftområden /11-6/, Spiralramp med ett driftområde /11-7/, Schaktalternativ med ett driftområde /11-8/.

Som underlag för de olika tillfartsalternativen ramp och/eller schakt genomfördes en utredning 2003 /11-9/. Resultatet av detta arbete är en rekommendation att anlägga både ramp och schakt och SKB har utarbetat en principiell utformning av djupförvaret, se figur 11-2, som omfattar en ramp som används för tunga transporter, ett skipschakt för transport av bergmassor och återfyllning, ett hisschakt, och tre ventilationsschakt.

En viktig fråga vid projekteringen av undermarksdelen är att anpassa den till de geologiska förhållandena på platsen. Anpassningen innebär att layout och placering av tunnlar, schakt, bergrum samt val av positioner för deponering av kapslar successivt justeras allteftersom mer detaljerad och fördjupad kunskap om förhållandena i berget blir tillgänglig. Metodiken kallas ibland för informationsbaserad design och innebär att undermarksdelen utformas för den tolkning av förhållandena i berget som bedöms vara mest trolig men att man också utarbetar varianter för alternativa tolkningar. När förhållandena har kunnat kartläggas i mer detalj under byggskedet utnyttjas den tillgängliga informationen för till exempel slutlig placering av deponeringstunnlar och enskilda deponeringshåll.



Figur 11-2. Principiell utformning av djupförvaret.

Program

Projekteringssteg D, som omfattar projektering av hela anläggningen både ovan och under mark, har delats upp i tre delsteg D0, D1 och D2. Syftet med detta är att stegvis inkludera tillgänglig information. En sammanfattning av stegens omfattning och produkter finns i tabell 11-1. Skedena D0 och D1 genomförs parallellt med de inledande platsundersökningarna (2002–2004) och skede D2 genomförs parallellt med de kompletta platsundersökningarna (2005–2007).

Layout D0 innebär en inledning på platsanpassning av ovanmarksdelen och att preliminära förslag på alternativa lägen i Oskarshamn respektive Forsmark utarbetas. Figur 11-3 illustrerar ett exempel på utformning av driftområdet som tagits fram.

I Layout D1 vidareutvecklas alternativa funktionslösningar och tekniska lösningar för bland annat driftområden och tillfartsalternativ för valda referenslägen för djupförvaret. I kombination med detta sker en lokal platsanpassning av förvarets undermarksdel till tillgänglig geologisk information. Förslag på alternativa layouter till denna presenteras. Den lokala anpassningen innebär också att ovan- och undermarksdelen samordnas. Ett dokument per plats sammanställs. Redovisningsnivån är ungefär den samma som i Layout E, men platsanpassad. Undermarkslayouten utgör ett underlag för den preliminära säkerhetsbedömning som redovisas vid utgången av det inledande platsundersökningsskedet. Utredningar av påverkan på miljö och samhälle genomförs.

Layout D2, vilken baseras på Layout D1 och resultat från platsundersökningarna, visar genomförandet mer specifikt genom att bland annat i detalj beskriva lösningar för olika arbeten och funktioner hos ovan- och undermarksdelen. Placeringen av undermarksdelen verifieras med ny tillgänglig information, så som undersökningresultat och platsmodell version 2.2, uppdaterade motiv för val av utformning samt uppdaterade konstruktions- och projekteringsförutsättningar. Layout D2 ska beskrivas så att den utgör ett underlag för den säkerhetsredovisning (SR-Site), som ingår i ansökan om djupförvaret.

Projekteringen under platsundersökningsskedet omfattar dessutom att ta fram detaljerade projekteringsförutsättningar och program inför nästa skede, byggskedet.

Tabell 11-1. Sammanfattning av projekteringsstegens omfattning och produkter.

| Projekteringssteg | Omfattning | Produkter |
|-------------------|---|---|
| Layout E | Samlad ej platsanpassad projektering. | Anläggningsbeskrivning baserad på teoretiska layouter för ovan- och undermarksdelen /11-6, 11-7, 11-8/. |
| Layout D0 | Platsanpassad projektering av ovanmarksdelen. | Sammanställning av möjliga lägen och layouter för ovanmarksdelen. |
| Layout D1 | Platsanpassad projektering av undermarksdelen baserad på data från IPLU och genomförda samråd. | Layout för valda alternativ för ovan- och undermarksdelen. Anläggningsbeskrivningar baserade på alternativa layouter. Underlag för preliminär säkerhetsbedömning. |
| Layout D2 | Fortsatt platsanpassad projektering av anläggningen baserad på platsdata från KPLU och med hänsyn till säkerhetsanalys och MKB. Uppdatering av Layout D1 med hänsyn till teknikutveckling och resultat från projektering. Underlag för genomförande av markarbeten samt framtagning av handlingar för bygge av ramp och schakt. | Layout för föreslagen anläggning med definitiv situationsplan för ovanmarksdelen och definitiv placering av ramp och schakt. Anläggningsbeskrivning baserad på föreslagen eller beslutad layout. Underlag för SR-Site. Underlag för ansökan om djupförvaret. Underlag för upprättande av huvud- och bygghandlingar för i första hand ramp och schakt. |



Figur 11-3. Djupförvarets driftområde vid infarten till Forsmarks kärnkraftverk under Layout D0-skedet.

Under byggskedet sker en mer och mer detaljerad projektering av undermarksdelens olika utrymmen, ovanmarksdelens enskilda byggnader, markarbeten, tekniska system och installationer. Ett program för byggskedet kommer att tas fram under denna Fud-period där projekteringen av djupförvarsanläggningen ingår som en del. Den övergripande tidsplanen för detta arbete innebär att en första version av programmet tas fram 2005. Denna detaljeras sedan successivt för att kunna presenteras i sin helhet i samband med ansökan om djupförvaret under 2008.

12 Djupförvar – övervakning

SKB definierar långtidsobservationer som ”sammanhängande eller upprepade observationer eller mätningar av parametrar för att öka den vetenskapliga förståelsen för platsen och förvaret, för att visa att ställda krav är uppfyllda eller för att anpassa planerna till resultaten”. Denna definition omfattar kontrollprogram och övervakning och häri ingår observationer för att bekräfta kärnämneskontroll (safeguards) i djupförvaret. SKB:s definition av långtidsobservationer innefattar inte enstaka mätningar eller observationer och det underförstås att observationerna upprepas i samma punkter eller områden.

Långtidsobservationer under det stegvisa genomförandet av djupförvaret har flera syften, men huvudsakligen att:

- Upprätta primära jämförelsedata (primary baseline) för förvarsplatsen.
- Utveckla och demonstrera förståelse av förvarsplatsen och barriärernas funktion.
- Ge underlag till beslutsprocessen.
- Visa att krav ställda i internationella och nationella riktlinjer och föreskrifter är uppfyllda.

Specifika syften med långtidsobservationer är att:

- Erhålla kunskap om ostörda förhållanden i naturen och dess säsongsvariationer för att urskilja och utvärdera den påverkan som aktiviteter i djupförvarsanläggningen får under olika skeden.
- Stärka förståelsen av djupförvarssystemets funktion för att stödja säkerhetsredovisningen och för att pröva modeller och antaganden.
- Följa förvarets miljöpåverkan.
- Ge underlag för kontroll av arbetsmiljön så att den är säker med hänsyn till radiologiska och icke radiologiska effekter.
- Visa att krav på kärnämneskontroll uppfylls.

12.1 Långtidsobservationer

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 identifierade SKB ett behov av att upprätta en policy för långtidsobservationer och det möjliga behovet av kontinuerliga och periodiska observationer och mätningar listades preliminärt. SKB beskrev också behovet av att upprätta kontrollprogram för miljöpåverkan och radiologisk kontroll.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Som ett resultat av Fud 2001, initierade SKB ett projekt om långtidsobservationer för djupförvaret och ett ramverk för dessa har utarbetats /12-1/.

Projektet omfattade en genomgång av använda definitioner och nomenklaturer samt en internationell översikt av området. En presentation av SKB:s tidigare erfarenheter av långtidsobservationer ingår också. SKB:s deltagande i EU-projektet ”Tematiskt nätverk om funktionen av långtidsobservationer vid stegvist genomförande av slutförvaring” /12-2/ har varit en viktig del i projektet. Nätverket startades för att öka förståelsen av den roll som långtidsobservationer kan spela och vilka alternativ för observationer som finns att tillgå. Inom nätverket har långtidsobservationernas bidrag till beslutsprocessen, säkerheten under driftskedet och efter förslutning samt observationernas betydelse för tilltron till säkerheten diskuterats.

Det internationella regelverket, liksom det svenska regelverket, förespråkar långtidsobservationer under alla steg i genomförandet av djupförvaret med begränsningen att det förslutna förvarets säkerhet inte ska vara beroende av långtidsobservationer eller av kommande underhåll. De steg och åtgärder som vidtas, för att genomföra långtidsobservationer, ska antingen ha en liten eller försumbar påverkan på förvarets säkerhet eller medföra en förbättrad säkerhet.

SKB har under ett antal år, inte minst under pågående platsundersökningar, pågående aktiviteter och utbyggnad vid Äspölaboratoriet samt den nyligen genomförda utbyggnaden av Clab, samlat betydande erfarenheter från långtidsobservationer av kärntekniska och icke kärntekniska anläggningar. Observationerna har rört till exempel mekaniska, geokemiska och geohydrologiska förhållanden i berget före och under utbyggnad samt under drift av anläggningarna. Resultaten av observationerna har utnyttjats i byggskedet för att detaljanpassa anläggningarna och för att åstadkomma hög säkerhet vid bygge och drift. Erfarenheter kan också hämtas från de långtidsobservationer av grundvatten och barriärfunktioner som genomförs vid slutförvaret för låg- och medelaktivt avfall (SFR) och vid Äspölaboratoriet. Förvärvade erfarenheter av långtidsobservationer rör alla aspekter från utformning, installation, drift och underhåll till avveckling av mätsystem.

Program

De nu pågående platsundersökningarna är en viktig del i det program för långtidsobservationer som kommer att utarbetas och detaljeras under Fud-perioden.

Under platsundersökningsskedet sammanställs primära jämförelsedata (primary baseline) från undersökningarna från markytan. Syftet med jämförelsedata är att skapa en referens så att förändringar orsakade av utbyggnaden, driften och förslutningen av djupförvarsanläggningen kan identifieras och särskiljas från naturliga variationer och variationer orsakade av andra mänskliga aktiviteter i förvarets omgivning. Identifierade förändringar kommer också att jämföras med skattningar av förändringarna framtagna med hjälp av modeller av berget och förvaret. Förändringarna kan också användas för att anpassa förvaret till de geologiska förhållandena på platsen. Under platsundersökningarna samlas information om till exempel markanvändning, ytnära ekosystem, geologi, hydrogeologi, bergmekanik och hydrokemi. Insamlandet av jämförelsedata pågår under relativt lång tid och mätfrekvensen avvägs så att säsons-, och årsvariationer i möjligaste mån omfattas av materialet.

En översikt över möjliga processer, parametrar som ingår i primära jämförelsedata för långtidsobservationer finns publicerad /12-1/. De observationer som genomförs under platsundersökningsskedet följer i huvudsak det generella genomförandeprogrammet /12-3/, där undersökningsmetoderna beskrivits, och de platsanpassade program som tagits fram /12-4, 12-5/.

Under byggskedet fortskrider detaljerade undersökningar av berget från ytan samtidigt som undermarksdelen anläggs och berget undersöks. De långtidsobservationer som genomförs under detta skede fokuserar på förståelsen av geohydrologiska, geokemiska och bergmekaniska processer och deras påverkan på förvarets långsiktiga funktion, men omfattar också dokumentation av de störningar som utbyggnaden av förvaret medför samt kontroll av miljöpåverkan.

Planering för observationer under byggskedet pågår och det förutses att redovisning av detaljerna sker i det övergripande programmet för byggskedet, se avsnitt 11.3.

Program för långtidsobservationer ska bland annat beskriva följande /12-1/:

- Målen med programmet för långtidsobservationer.
- Principer för val av vad som långtidsobserveras.
- Urskiljning av egenskaper, processer, fenomen och observerbara storheter som ska långtidsobserveras.
- Vilka metoder som ska användas.
- Observationernas varaktighet och frekvens, liksom principer för hur mätningar kan avvecklas.

- Rutiner för kvalitetskontroll och rapportering av resultat.
- Tröskelvärden som kräver åtgärder.
- Vilka åtgärder som ska vidtas om tröskelvärden överskrids.

Metod- och teknikutveckling sker löpande inom ramen för planerad verksamhet.

Under driftskedet kan långtidsobservationer av temperatur, mikroseismik, grundvattentryck etc pågå liksom kontroll av återmättnad och tryckuppbyggnad i återfyllningen. System för att verifiera kärnämneskontroll ska också införas.

Det förslutna förvarets säkerhet är inte beroende av övervakning eller långtidsobservationer men en viss institutionell kontroll kan antas fortgå även efter förslutning, bland annat med hänsyn till kärnämneskontroll (se avsnitt 12.2).

12.2 Safeguards och fysiskt skydd

För att få ett väl fungerande safeguardssystem är det viktigt att ha en helhetssyn på hela bränslehanteringskedjan varför inkapsling, transport av kapseln och deponering av bränsle måste betraktas som en helhet. Efter inkapsling av det använda kärnbränslet försämras möjligheterna till verifiering och mätning av kapslarnas identitet eller innehåll, se kapitel 8 där safeguards för inkapslingsanläggningen redovisas. Under transporter och drift av djupförvaret krävs därför en god kontroll av flödet av det använda kärnbränslet till och från djupförvaret. Detta ställer krav på en kontrollfunktion.

Sverige har genom internationella överenskommelser, till exempel ickespridningsavtalet, Euratomfördraget /12-6/ och flera bilaterala avtal, förbundit sig att använda kärnämne enbart för fredligt bruk, samt åtagit sig att redovisa all hantering av kärnämnen bland annat det använda kärnbränslet. Sverige har också accepterat att allt material av denna typ står under internationell kontroll. Denna kontroll utförs av Euratom och IAEA och på nationell nivå av SKI. Kontrollen syftar till att kontrollorganen i tid ska upptäcka om kärnämne avleds från systemet.

IAEA har givit ut ett utkast till ”policy for safeguards” för slutförvar /12-7/ där det bland annat rekommenderas att safeguardskontroll ska upprätthållas även sedan djupförvarsanläggningen har återfyllts och förslutits. Inom IAEA har man konstaterat att ett förslutet djupförvar behöver stå under safeguardskontroll, så länge motsvarande kontroll sker på andra områden.

Arbete pågår internationellt för att definiera kraven på safeguardssystemet för ett förslutet geologiskt förvar. I vissa avseenden kan det finnas behov av att utveckla ny teknik. Detta kan ske genom enskilda staters stöd till IAEA. Anledningen till detta är att inkapslat bränsle liksom deponerat bränsle inte kan kontrolleras genom mätningar för att bestämma bränslets innehåll av klyvbart material. Det är därför nödvändigt att det finns ett antal olika och av varandra oberoende komponenter i safeguardssystemet som garanterar en kontinuerlig kunskap om förhållandena i djupförvaret.

I systemet utgör kapseln en redovisningsenhet. Varje kapsel har en unik beteckning som noteras och dess innehåll dokumenteras. Förflyttningen av kapslar dokumenteras i safeguards-redovisningen. Kapselns unika beteckning kontrolleras och dokumenteras när kapseln lyfts upp ur transportbehållaren i djupförvaret och deponeras.

Vid ingången till djupförvaret kan mätutrustning, som känner av om transportbehållaren med kapseln eller annan utrustning innehåller använt bränsle eller ej, placeras. På så sätt kan kontroll ske av att inget använt bränsle avleds från djupförvaret.

En viktig komponent i systemet för safeguardskontroll av ett djupförvar är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med de ritningar som presenterats, så att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har angivits, eller att det förekommer utrymmen där annan verksamhet förekommer än vad som har angivits. Detta innebär att kontrollorganen regelbundet behöver genomföra inspektioner före och under bygget samt under drift och förslutning.

Ett eventuellt återtag av deponerade kapslar ställer också krav på safeguardssystemet. Det gäller att otvetydigt kunna fastställa identiteten på de kapslar som tas upp. Detta ställer krav på att märkningen av kapslarna är beständig under lång tid. Detsamma gäller för informationen om kapselns innehåll. I övrigt kan samma principer tillämpas vid återtag, transport och mellanlagring som gäller för de olika momenten vid deponering av kapslarna.

Fysiskt skydd omfattar den bevakning och andra åtgärder som vidtas för att skydda bränslet och annat radioaktivt material från tillgrepp eller yttre åverkan. För hantering och transporter finns ett fungerande system för fysiskt skydd. Vid djupförvaret kommer driftområdet att vara inhägnat med staket och annan övervakningsutrustning i likhet med vad som finns på kärntekniska anläggningar. Tillträde till området kommer att vara reglerat och kontrollerat på motsvarande sätt som vid de kärntekniska anläggningar som drivs i dag. I ett förslutet djupförvar behövs inget fysiskt skydd utan övervakning kan ske samordnat med safeguards med exempelvis satellitövervakning.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I sin granskning av Fud 2001 ansåg SKI att områdena kärnämneskontroll och fysiskt skydd av djupförvaret var mycket översiktligt beskrivna och SKI framhöll att höga krav måste ställas både på icke spridningskontroll av klyvbart material och på det fysiska skyddet av detsamma. SKB instämmer inte till fullo i denna invändning eftersom det är kontrollorganen Euratom, IAEA och SKI som beskriver hur kärnämneskontrollen av djupförvaret ska utformas. SKB har ett stort intresse av att i ett tidigt skede samarbeta med kontrollorganen för att kunna anpassa utformningen av djupförvarsanläggningen så att kärnämneskontrollen underlättas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

IAEA, Euratom och SKI samverkar i och organiserar internationella arbetsgrupper för safeguardsfrågor för både inkapsling och geologiska djupförvar för använt bränsle. SKB anser att ett tidigt samarbete i kärnämnesfrågan med kontrollorganen är viktig för att säkerställa att anläggningarna utformas på ett ändamålsenligt sätt så att kärnämneskontrollen inte försvåras. Genom att delta i de internationella arbetsgrupperna "Esarda Working Group on the Back End of the Nuclear Fuel Cycle" och "IAEA Experts Group on Safeguards for Final Disposal of Spent Fuel in Geological Repositories" vill SKB säkerställa ett tidigt informationsutbyte och samarbete.

Ett led i detta arbete har varit att på plats vid Äspölaboratoriet informera arbetsgrupperna om hur hanteringen av kärnämne och deponeringen av kapslar är tänkt att genomföras i djupförvarsanläggningen. SKB har också vid ett möte i Oskarshamn presenterat för IAEA /12-8/ hur och vilken information som samlas in under platsundersökningsskedet. Vid mötet presenterade SKB också den möjlighet som insamlad information ger för tillsynsorganen att inhämta primära jämförelsedata, vilka kan behövas för att i framtiden identifiera förändringar som skulle kunna tyda på avledning av kärnämne.

Vid utformningen av djupförvaret kommer hänsyn att tas till safeguardsproblematiken redan vid designstadiet. Utrymmen för övervakningsutrustning etc planeras in efter tillsynsorganens synpunkter och anläggningen utformas med så stor transparens som möjligt.

Utvecklingen inom safeguards innebär att traditionell safeguards med sigill, kamerainspektioner etc kommer att kompletteras eller delvis ersättas av indirekt kontroll så som mätningar i omgivningen, inhämtning av öppen information och oanmälda inspektioner. Denna utveckling kommer naturligtvis att påverka utformningen av safeguardssystemet vid tidpunkten för tillståndsansökan. Exempel på denna utveckling är det så kallade tilläggsprotokollet /12-9/.

Program

SKB kommer under perioden 2005–2010 att följa den internationella utvecklingen inom området men planerar inte att bedriva någon egen utveckling eller demonstration av övervakningsutrustning eller liknande för safeguardsändamål.

Del III

Säkerhetsanalys och forskning

13 Översikt – säkerhetsanalys och forskning

14 Säkerhetsanalys

15 Bränsle

16 Kapseln som barriär

17 Buffert

18 Återfyllning

19 Geosfär

20 Biosfär

21 Klimat

22 Samhällsforskning

23 Alternativa metoder

13 Översikt – säkerhetsanalys och forskning

Den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar för använt bränsle utvärderas med säkerhetsanalyser. Dessa analyser består i huvudsak av att först noggrant beskriva förvarets begynnelse-tillstånd, till exempel vid dess förslutning, sedan kartlägga tänkbara förändringar på lång sikt och sist beskriva konsekvenserna för människa och miljö. Säkerhetsanalysen använder vetenskaplig metodik och hämtar kunskap om långsiktiga förändringar från forskningen.

SKB:s forskning om slutförvaring av använt bränsle kan delas upp i tre olika forskningsområden:

- Långsiktig säkerhet.
- Samhällsvetenskap.
- Alternativa metoder.

Områdena beskrivs översiktligt i det här kapitlet och mera detaljerat i efterföljande kapitel. Mest uppmärksamhet ägnas åt forskning om långsiktig säkerhet. Dess uppgift är att bygga under SKB:s säkerhetsanalyser av djupförvaret för använt bränsle, och det är säkerhetsanalysens uppgift att bidra till prioriteringen av forskningen. Nedan diskuteras processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten och en grov bedömning görs av insatserna under den kommande treårsperioden.

Samhällsvetenskaplig forskning är en relativt ny satsning av SKB, åtminstone i den omfattning som nu planeras. Inriktningen är mot de frågor som behöver belysas i samband med miljökonsekvensbeskrivningen, MKB.

Alternativa metoder för att ta hand om använt bränsle är ett område där SKB inskränker sig till att följa utvecklingen av två utvalda metoder: separation och transmutation samt djupa håll.

Forskningen med inriktning på låg- och medelaktivt avfall redovisas i kapitel 25.

13.1 Säkerhetsanalys

De viktigaste säkerhetsanalysprojekten under perioden är SR-Can och SR-Site. Syftet med dessa projekt är att producera säkerhetsanalyser till ansökningarna om att få uppföra en inkapslingsanläggning respektive ett djupförvar. För närvarande pågår SR-Can. En viktig milstolpe är interimrapporten, som redovisar den metodik som kommer att användas /13-1/.

Många av de modeller som säkerhetsanalysen behöver för att beräkna till exempel grundvattenflöde, buffertens kemiska utveckling och inlandsisars utveckling etc, tas fram inom forskningsområdena geosfär, buffert, klimat och så vidare. En central uppgift inom området säkerhetsanalys är att utnyttja dessa modeller, men även att utveckla modellverktyg för integrerad modellering. En systemmodell har utvecklats, vilken består av delmodeller som var och en beskriver en process i förvaret. Därigenom kan man snabbt pröva olika uppsättningar indata och även göra probabilistiska beräkningar om så erfordras, se avsnitt 14.2.1.

Numeriska beräkningar av radionuklidtransport görs med hjälp av programpaketet Proper. Dessutom utvecklas ett alternativt programpaket, Tensit, som kan exekveras på en personator. De kommersiella koderna Matlab och Simulink används i stor utsträckning inom Tensit, vilket i hög grad kommer att underlätta det framtida arbetet med att underhålla koderna och behålla kunskapen om dem. Närzonsberäkningarna och biosfärsberäkningarna är redan fullständigt implementerade i Matlab och Simulink. Det har för övrigt skett en betydande utveckling av biosfärsmodulen som ingår i Tensit, se avsnitt 14.2.2. Proper och Tensit kommer båda att användas till SR-Can.

Som ett komplement till de numeriska modellerna har analytiska förenklade beskrivningar av när- och fjärrzonsmodeller utvecklats. De är utomordentligt snabba och kan till exempel användas för att göra gränssättande beräkningar och kompletterande probabilistiska beräkningar i kommande säkerhetsanalyser.

Arbetet inom säkerhetsanalysen är koncentrerat på förvarskonceptet KBS-3V, men varianten KBS-3H med horisontell deponering av kapslarna studeras också. Den långsiktiga säkerheten kommer att analyseras under ledning av Posiva, med målet att presentera en säkerhetsanalys 2007 med Olkiluoto som referensplats.

13.2 Forskning om långsiktig säkerhet

Målet med den forskning om långsiktig säkerhet, som SKB bedriver, är att vi ska förstå de processer (förändringar på lång sikt) som förekommer i ett djupförvar och hur de påverkar förvarets förmåga att isolera det använda kärnbränslet.

I kapitel 15 till 19 följer detaljerade redovisningar av programmen för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning och geosfär. För varje förvarsdela diskuteras först eventuella forsknings- och utvecklingsbehov för initialtillståndet. Tidpunkten för initialtillståndet kan vara olika för olika förvarsdelar. Många analyser rör utvecklingen kring enskilda deponeringshål. Alla deponeringshål kommer att genomgå i stort sett samma utveckling från den tidpunkt kapsel och bentonit deponeras i dem.

Efter diskussionen om forsknings- och utvecklingsbehovet för initialtillståndet behandlas samtliga processer. Processerna är indelade i strålrelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C) samt processer relaterade till radionuklidtransport. Biologiska processer – mikrobiella – är inkluderade i de kemiska processerna (C). I vissa fall är en behandling av enskilda processer inte tillräcklig för att förstå utvecklingen. Därför har processuppsättningen ibland kompletterats med beskrivningar som karakteriseras som integrerade studier. Det gäller till exempel en skadad kapsels hydro-mekanisk-kemiska (HMC) utveckling och den termo-hydro-mekaniska (THM) utvecklingen för en omättad buffert.

Kapitel 20 och 21 diskuterar den forskning som behövs för att kartlägga de förändringar som biosfärens och klimatets utveckling ger upphov till.

Något fristående kapitel om naturliga analogier som i Fud 2001 finns inte med den här gången. Verksamheten på området är numera helt integrerad i forskningsprogrammen för de olika barriärerna. Detta beskrivs närmare i avsnittet 13.2.8.

Tabell 13-1 visar alla processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten som behandlas i kapitel 15 till 19. Färgkoden ger en grov uppfattning om storleken av de planerade insatserna under den kommande treårsperioden för respektive process. Forskningsinsatsernas omfattning speglar inte nödvändigtvis betydelsen för den långsiktiga säkerheten. Motsvarande information för initialtillståndet finns i tabell 13-2. De följande avsnitten ger en kort överblick över de viktigaste forskningsområdena för de olika delarna av förvaret, för biosfären och klimatet.

Utgångspunkten för den detaljerade redovisningen av forskningsprogrammet är utförandet enligt KBS-3V, det vill säga vertikala deponeringshål borrhåll från underjordiska tunnlar. Men i och med att varianten KBS-3H tilldrar sig växande uppmärksamhet redovisas även studier som är specifika för liggande kapslar, omgivna av buffert och pluggar i horisontella tunnlar. Metoden finns närmare beskriven i avsnitt 10.7. Utvecklingen, forskningen och utvärderingen av KBS-3H görs i nära samarbete med finska Posiva. När det gäller forskning med avseende på långsiktig säkerhet är många processer naturligtvis gemensamma, men det finns skillnader, framför allt när det gäller bufferten. Olika studier har påbörjats och kunskapsläget liksom det framtida programmet finns redovisade i kapitel 17, till exempel avsnitten 17.2.7, 17.2.10 och 17.2.19. Man kan förvänta sig att intresset för området kommer att öka och att fler studier inleds när arbetet med säkerhetsanalysen för KBS-3H, som leds av Posiva, kommer igång på allvar.

| Tabell 13-1. Forskning kring långsiktig säkerhet. Kod: | | Stora insatser | Måttliga insatser | Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod | |
|---|--|------------------------------------|--|---|--|
| Bränsle | Kapsel | Buffert | Aterfyllning | Geosfär | |
| R | Radioaktivt sönderfall 15.2.2 Stråldämpning/värmealstring 15.2.3 Inducerad fission (kriticitet) 15.2.4 | Stråldämpning/värmealstring 16.2.2 | Stråldämpning/värmealstring 17.2.2 | Stråldämpning/värmealstring 18.2.3 | |
| T | Värmetransport 15.2.5 | Värmetransport 16.2.3 | Värmetransport 17.2.3 | Värmetransport 18.2.4 | Värmetransport 19.2.2 |
| H | Vatten/gastransport 15.2.6 | Väntetransport omättad 17.2.4 | Väntetransport omättad 17.2.4 | Väntetransport omättad 18.2.5 | Grundvattenströmning 19.2.3 |
| | | Väntetransport mättad 17.2.5 | Väntetransport mättad 17.2.5 | Väntetransport mättad 18.2.6 | |
| | | Gastransport/gaslösning 17.2.6 | Gastransport/gaslösning 17.2.6 | Gastransport/gaslösning 18.2.7 | Gasströmning/gaslösning 19.2.4 |
| M | Deformation insats 16.2.4 Yttre deformation Cu 16.2.5 Inre deformation Cu 16.2.7 | Svällning 17.2.7 | Svällning 17.2.7 | Svällning 18.2.8 | Rörelser i intakt berg 19.2.5 |
| | Termisk expansion/ kapslingsbrott 15.2.7 | Termisk expansion 16.2.6 | Termisk expansion 17.2.11 | Termisk expansion 18.2.10 | Termisk rörelse 19.2.6 |
| | | | | | Erosion 19.2.10 |
| C | Advektion/diffusion 15.2.8 | Advektion 17.2.13 | Advektion 17.2.13 | Advektion 18.2.11 | Advektion/blandning 19.2.11 |
| | Restgasradiolys/syrabildning 15.2.9 | Korrosion insats 16.2.8 | Diffusion 17.2.14 | Diffusion 18.2.12 | Diffusion 19.2.13 |
| | Vattenradiolys 15.2.10 | Galvanisk korrosion 16.2.9 | Osmos (salteffekt) 17.2.15 | Osmos (salteffekt) 18.2.13 | Reaktioner med berget 19.2.15 |
| | Metallkorrosion 15.2.11 | Spänningskorr insats 16.2.10 | Jonbyte/sorption 17.2.16 | Jonbyte/sorption 18.2.14 | Lösning/fällning sprickmineral 19.2.16 |
| | Bränsleupplösning 15.2.12 | Strålpåverkan 16.2.11 | Montmorillonitomvandling 17.2.17 | Montmorillonitomvandling 18.2.15 | Mikrobiella processer 19.2.18 |
| | Lösning gapinventarium 15.2.13 | Kopparkorrosion 16.2.12 | Lösning/fällning förorening 17.2.18 | Lösning/fällning förorening 18.2.16 | Oorganisk nedbrytning 19.2.19 |
| | Speciering radionuklider/ kolloidbildning 15.2.14 | Spänningskorr hölje 16.2.13 | Kolloidfrigörelse/erosion 17.2.19 | Kolloidfrigörelse/erosion 18.2.17 | Kolloidsättning 19.2.20 |
| | Heliumproduktion 15.2.15 | Kornfilväxt koppar 16.2.14 | Strålinducerad montmorillonit-omvandling 17.2.20 | Strålinducerad omvandling 18.2.18 | Gasbildning/gaslösning 19.2.22 |
| | | | Radiolys porvatten 17.2.21 | Radiolys porvatten 18.2.19 | Metanisomsättning 19.2.23 |
| Integration | | | Mikrobiella processer 17.2.22 | Mikrobiella processer 18.2.20 | Saltutfrysning 19.2.24 |
| | HMC utveckling skadad kapsel 16.2.16 | | THM utveckling omättad 17.2.12 | | HC utveckling 19.2.25 |
| | | | THMC utveckling mättad 17.2.23 | | |
| Radionuklidtransport | | | Advektion 17.2.24 | Advektion 18.2.21 | Advektion/blandning 19.2.12 |
| | | | Diffusion 17.2.25 | Diffusion 18.2.22 | Diffusion 19.2.14 |
| | | | Sorption 17.2.26 | Sorption 18.2.23 | Sorption 19.2.17 |
| | | | Speciering 17.2.27 | Speciering 18.2.24 | Speciering 15.2.14 |
| | | | Kolloidtransport 17.2.28 | | Kolloidtransport 19.2.21 |
| | | | | | Gasfasttransport 19.2.4 |
| | RN-transport närområde 16.2.15 | | | | RN-transport geosfär 19.2.26 |

Tabell 13-2. Forskning kring förvarets initialtillstånd.

| Bränsle | Kapsel | Buffert | Aterfyllning | Geosfär | |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|---------------------|--|
| Geometri 15.1.2 | Geometri 16.1.2 | Geometri 17.1.2 | Geometri 18.1.2 | Platsundersökningar | |
| Strålintensitet 15.1.3 | Strålintensitet 16.1.3 | Porgeometri 17.1.3 | Porgeometri 18.1.3 | | |
| Temperatur 15.1.4 | Temperatur 16.1.4 | Strålintensitet 17.1.4 | Strålintensitet 18.1.4 | | |
| Hydrovariabler 15.1.5 | Mekaniska spänningar 16.1.5 | Temperatur 17.1.5 | Temperatur 18.1.5 | | |
| Mekaniska spänningar 15.1.6 | Materialsammansättning 16.1.6 | Smektitihalt 17.1.6 | Smektitihalt 18.1.6 | | |
| Totalt radionuklidinventarium 15.1.7 | | Vattenhalt 17.1.7 | Vattenhalt 18.1.7 | | |
| Gapinventarium 15.1.8 | | Gashalter 17.1.8 | Gashalter 18.1.8 | | |
| Materialsammansättning 15.1.9 | | Hydrovariabler 17.1.9 | Hydrovariabler 18.1.9 | | |
| Vattensammansättning 15.1.10 | | Svälltryck 17.1.10 | Svälltryck 18.1.10 | | |
| Gassammansättning 15.1.11 | | Smektitisammansättning 17.1.11 | Smektitisammansättning 18.1.11 | | |
| | | Porvattensammansättning 17.1.12 | Porvattensammansättning 18.1.12 | | |
| | | Föreningshalter 17.1.13 | Föreningshalter 18.1.13 | | |
| Kod: | Stora insatser | Måttliga insatser | Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod | | |

13.2.1 Bränsle

Upplösning av bränsle, som inträffar om det kommer i kontakt med grundvattnet via en skada i kapseln, är en viktig process att behandla i säkerhetsanalysen. Forskning om bränsleupplösning prioriterades i Fud 2001, och i avsnitt 15.2.12 presenteras en del nya resultat samt det fortsatta programmet. Området förblir prioriterat åtminstone till dess modellerna för bränsleupplösning har prövats i säkerhetsanalysen SR-Can.

13.2.2 Kapsel

För en intakt kapsel i förvaret är det framför allt mekaniska belastningar under en glaciation och vid jordskalv som måste beaktas. Materialdata tas fram och tester genomförs för att kunna beräkna hållfastheten hos gjutjärnsinsatsen. Nyvunnen kunskap och det fortsatta programmet beskrivs i avsnitt 16.2.4. Kopparkorrosion fortsätter att vara ett viktigt område där olika typer av experiment genomförs, avsnitt 16.2.12 och 16.2.13.

För en intakt kapsel är det angeläget att bedöma typer av fel och även frekvenser av fel som kan uppstå i kapselns locksvets. Sådan information samlas in i samband med provsvetsningarna vid Kapsellaboratoriet, se avsnitt 16.1.2.

Antar man att kapseln initialt skadas så att grundvatten tränger in kan järnet i insatsen korrodera. Omfattningen och betydelsen av detta har prövats med experiment av olika slag. Ytterligare experiment med korrosion av järn återstår att genomföra, se avsnitt 16.2.8.

13.2.3 Buffert

Det är viktigt att kunna förutsäga vilket tillstånd som bufferten når efter full vattenmättnad och avslutad homogenisering, och ungefär hur lång tid som krävs för detta. När vatten tas upp från omgivningen homogeniseras materialet, samtidigt som svälltrycket utbildas och värmeledningen förändras. Förloppet studeras både i fält och med modeller. Tyngdpunkten i laboratorieundersökningarna har lagts på att bestämma de materialparametrar som behövs för modellberäkningarna, se avsnitt 17.2.12.

En vattenmättad buffert är jämförelsevis enklare att beskriva, men det finns likväl ett antal processer som behöver studeras, inte minst med tanke på de långa tider som måste överblickas. Processer där ytterligare forskning behövs är bland annat gastransport, avsnitt 17.2.6, kolloidfrigörelse och erosion, avsnitt 17.2.19 samt mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel, avsnitt 17.2.9.

I och med KBS-3H behöver en del av studierna utökas. Ett exempel är den successiva deponeeringen av färdiga kapsel-buffertpaket, omväxlande med pluggar mellan paketen, vilket skapar en situation där erosion skulle kunna uppstå, se avsnitt 17.2.19.

13.2.4 Återfyllning

SKB studerar tillsammans med Posiva ett antal olika koncept för tunnelåterfyllning. Detta tillsammans med tester av olika lerbaserade material fortsätter att vara en prioriterad verksamhet, se avsnitt 18.1.6. Långsiktig utveckling har flera frågor gemensamma med bufferten och samma typ av kunskaper krävs, även om omfattning och relativ betydelse kan skilja sig åt.

Processer som alltjämt är av betydelse att utreda är svällning, den efterföljande långsiktiga mekaniska utvecklingen, avsnitt 18.2.9 och sådant som kan påverka detta, bland annat kemisk påverkan, avsnitt 18.2.13, kolloidbildning och erosion, avsnitt 18.2.17.

13.2.5 Geosfär

Utvecklingen av modeller för berg rörelser fortsätter med inriktning på kommande säkerhetsanalyser, närmast SR-Can. Modellutvecklingen beskrivs i avsnitt 19.2.7. En frågeställning som speciellt utreds i sammanhanget är uppkomsten av postglaciala förkastningar.

Modeller för grundvattenströmning utvecklas, främst för att få fram numeriska modeller för att utföra beräkningar åt säkerhetsanalysen. Kunskapen om grundvattenströmning har ökat genom de superregionala simuleringar, som nyligen genomförts för Norduppland respektive östra Småland. I fortsättningen kommer särskild uppmärksamhet att ägnas åt den ytnära hydrogeologin. Modellutvecklingen för grundvattenströmning beskrivs i avsnitt 19.2.3.

Ett flertal aktiviteter pågår som syftar till att öka kunskapen om transportmotståndet och hur man använder sig av detta för att beräkna spridningen av radionuklider upplösta i grundvattnet. Transportmotståndet begränsar spridningen och är en viktig egenskap hos berget. Processer som fortfarande behöver utredas är bland annat advektion/blandning, avsnitt 19.2.12, diffusion i bergmatrisen, avsnitt 19.2.14, kolloider, avsnitt 19.2.20 och 19.2.21 samt modellering av radionuklidtransport, avsnitt 19.2.26.

De grundvattenkemiska förhållandena undersöks alltid på platsen. Forskningsprogrammets uppgift är att komplettera de geokemiska undersökningarna, belysa stabiliteten hos rådande förhållanden och söka förutsäga de förändringar som kan inträffa, på kortare sikt till följd av att förvaret hålls öppet och på lång sikt genom inverkan av de främmande ämnen som eventuellt tillförs, se avsnitt 19.2.19. Processer som behöver utredas är bland annat reaktioner med berget, avsnitt 19.2.15, lösning och fällning av sprickmineral, avsnitt 19.2.16, mikrobiella processer, avsnitt 19.2.18.

13.2.6 Biosfär

Att beskriva biosfären och dess utveckling är en viktig del av säkerhetsanalysen, eftersom det är i biosfären som eventuella utsläpp från djupförvaret skulle få konsekvenser. Biosfären karakteriseras ingående i samband med platsundersökningarna. Dessutom är det nödvändigt att bedöma vilka förändringar som kan ske i framtiden och vilken betydelse dessa kan få för eventuella utsläpp. Störst uppmärksamhet kommer att ägnas åt de första 1 000 åren. Perioden därefter fram till nästa istid kan behandlas något mera översiktligt.

För att kunna beräkna spridningen av radionuklider i biosfären är det nödvändigt att känna till utsläppspunkterna. Det behövs med andra ord en sammanhängande beskrivning av hydrogeologiska och oceanografiska processer ända fram till utsläppspunkterna, se avsnitt 20.5. Spridningen i biosfären beskrivs med kompartementmodeller där biosfären delas upp i enheter mellan vilka överföring av radionuklider beräknas, se avsnitt 20.4.

Fortsatt arbete ägnas bland annat åt att ytterligare definiera och beskriva de viktigaste processerna i olika typer av ekosystem, såsom det terrestra, avsnitt 20.6 och det akvatiska, avsnitt 20.7. Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt kan ha stor inverkan på biosfären på en plats, till exempel genom att förändra strandlinjens läge, se avsnitt 20.8. Därmed finns en stark koppling till nästa program som behandlar klimatets utveckling, se nedan.

13.2.7 Klimat

Det är väsentligt att beskriva vilka förändringar som kan ske i det framtida klimatet och se om detta på något sätt kan påverka förvaret. Tidigare klimatförändringar med permafrost och inlandsis kommer högst sannolikt att inträffa även i framtiden på grund av jordens rörelse runt solen. Men även om den astronomiska rörelsen är lagbunden är det svårare att förutse det exakta förloppet av klimatförändringen på jorden. Det är många faktorer som påverkar klimatet. Ytterligare komplikationer är människans inverkan med utsläpp av växthusgaser. För säkerhetsanalysen är det viktigt att känna till urvalet av möjliga klimat och deras tänkbara

utvecklingsvägar på platsen för djupförvaret. Klimatforskningen som SKB stöder tar sikte på detta. Programmet beskrivs i kapitel 21.

13.2.8 Naturliga analogier

Numera är studier av naturliga analogier inget fristående program utan helt integrerat med forskningen om långsiktig säkerhet, uppdelat på olika koncept och olika barriärer.

SKI framhöll i sin granskning av Fud 2001 att naturliga analogier även fortsättningsvis borde ges hög prioritet, speciellt materialanalogier. Man ansåg vidare att SKB borde överväga att utnyttja den information som redan finns från avslutade projekt och att värdet av fältförsök på tidigare platser borde övervägas. Antropogena materialanalogier framhölls som något SKB borde överväga att studera. Analogier borde kunna användas för att bedöma fullständigheten i processbeskrivningar och man rekommenderade SKB att delta i EU-projekt inriktade på att ytterligare utvärdera redan avslutade projekt.

Studier av materialanalogier berörs i avsnitt 16.2.7 och 17.2.15. SKB har följt arbetet i EU:s tematiska nätverk Nanet (Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication). Bland annat samlar man in referenser till analogier som är relevanta för olika processer och olika barriärer i ett förvar. Ett annat mera närliggande område för SKB är Processrapporten. I den version som ligger till grund för säkerhetsanalysen SR 97 hänvisas till naturliga analogier för 14 av de olika processer som behandlas /13-2/. Inför SR-Can görs en uppdatering av Processrapporten och möjligheten finns att inkludera ytterligare exempel /13-3/.

13.2.9 Forskning i Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet är SKB:s anläggning för att utveckla, pröva och demonstrera teknik för underjordisk deponering av använt bränsle. Flera av projekten som genomförs där har även till syfte att forska om långsiktig säkerhet, och ett stort antal projekt är helt inriktade på sådana experiment. De flesta av de här experimenten avser bufferten och berget i deras funktion att skydda kapseln och tjäna som barriär mot spridning av radionuklider. Det förekommer även experiment som avser kapselns funktion och försök inriktade på bränslet. I tabell 13-3 ges ett antal exempel på Äspöprojekt som är helt eller delvis inriktade på långsiktig säkerhet. I tabellen hänvisas till avsnitt i följande kapitel där läsaren själv kan orientera sig i försökens betydelse för att förstå och modellera olika processer av betydelse för långsiktig säkerhet. Ibland är det teknikutveckling som är det främsta syftet i ett projekt och ibland kan gränserna mellan teknikutveckling och forskning vara flytande. Ty den långsiktiga säkerheten är naturligtvis utgångspunkten för all utveckling av djupförvarsteknik. Prövas ny teknik måste man samtidigt pröva att den uppfyller säkerhetsanalysens krav, eller – som ett första steg i en sådan prövning – ge argumenten för detta.

Den internationella medverkan i Äspölaboratoriet är av stor betydelse. En bred medverkan från många forskare i olika länder och organisationer innebär att gängse teorier och uppnådda resultat utsätts för en både omfattande och ingående prövning. Härvidlag har expertgrupperna varit till god hjälp. De sammansätts för speciella ändamål för att utveckla experimenten och tolka resultaten. Exempel på en sådan grupp är Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes, se avsnitt 19.2.26. Hydrogeologi, geokemi och masstransport i kristallint berg är exempel på områden där teorierna är många och åsikterna kan gå isär en del. Prova genom att ifrågasätta är och förblir ett viktigt inslag för att inte övertolka resultat eller alltför lättvindigt anamma gängse teorier och förklaringar.

Ett nytt och för framtiden viktigt inslag i Äspö är Högskolan i Kalmars forskarskola. Dess forskning om transport och spridningsmekanismer av miljöstörande ämnen i övergången mellan berg, jordlager och biosfär är av betydelse även för SKB. Förhoppningsvis kan utbildningen på forskarskolan också hjälpa till att utveckla kompetens för SKB:s framtida behov.

Tabell 13-3. Projekt och experiment i Äspölaboratoriet, vilka helt eller delvis är inriktade på forskning om långsiktig säkerhet.

| Projekt-experiment | Avsnitt |
|--|------------------------------------|
| RNR-försöken (inkluderar experiment med Chemlabsonden) | 15.2.12, 17.2.25, 19.2.17, 19.2.20 |
| Korrosionsförsök | 16.2.12, 16.2.16 |
| Prototypförvaret | 17.2.3, 19.2.2 |
| Lasgitförsöket | 17.2.4, 17.2.6, 17.2.12 |
| TBT-försöket | 17.2.4, 17.2.12 |
| Återtag | 17.2.4, 19.2.2 |
| Lot-försöken | 17.2.18, 17.2.25 |
| Kolloidprojektet (Colloid) | 17.2.19, 19.2.20, 19.2.21 |
| KBS-3H | 17.2.19 |
| Återfyllning och pluggning | 18.2.2 |
| Äspömodeller 2005 | 19.2.3 |
| Apse-försöket (Pelarförsöket) | 19.2.5, 19.2.6, 19.2.7, 19.2.8 |
| True-försöken | 19.2.14, 19.2.26 |
| LTDE-försöken | 19.2.14 |
| Matrisförsöket | 19.2.15 |
| Mikrobprojektet | 19.2.18, 19.2.22 |

Hänvisningarna avser avsnitt i kommande kapitel där motsvarande process behandlas, det vill säga kapitel 15 Bränsle, 16 Kapsel, 17 Buffert, 18 Återfyllning och 19 Geosfären.

13.3 Samhällsvetenskaplig forskning

SKB har nyligen beslutat sig för att stödja samhällsvetenskaplig forskning. Under 2003 kartlades vad som är av intresse för avfallsfrågan och kommunerna, en målsättning definierades och fyra samhällsvetenskapliga forskningsområden valdes ut: socioekonomiska effekter, beslutsprocesser, psykosociala effekter och omvärldsförändringar. En detaljerad redovisning av det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet finns i kapitel 22.

13.3.1 Socioekonomiska effekter

Syftet med forskningen inom området socioekonomiska effekter är att öka förståelsen för hur en Orts ekonomi och befolkningssammansättning påverkas av att en ny verksamhet med betydande omfattning etableras på orten.

13.3.2 Beslutsprocesser

Genom att öka kunskapen om politiska beslutsprocesser i komplexa frågor hoppas SKB få väsentlig vägledning till hur man bör genomföra samråden, utreda, planera och besluta om lokalisering av ett djupförvar.

13.3.3 Psykosociala effekter

Forskningen om psykosociala effekter ska ta reda på hur opinioner och attityder uppkommer och förändras i djupförvarsprojektets olika skeden. Förhoppningsvis kan sådan kunskap öka förståelsen mellan aktörerna och bidra positivt till genomförandet av samråd.

13.3.4 Omvärldsförändringar

Forskningen om omvärldsförändringar ska öka kunskapen om vilka faktorer och förändringar i omvärlden det är som har betydelse för djupförvarsprojektet och den ort i Sverige som till slut kommer ifråga. Denna kunskap kan vara värdefull för att planera, utreda, samråda och fatta beslut inför ansökan om tillstånd att lokalisera ett djupförvar.

13.4 Alternativa metoder

SKB:s forskning när det gäller alternativ till KBS-3 koncentrerar sig på två metoder: separation och transmutation samt djupa borrhål. Programmen beskrivs närmare i kapitel 23. Följande avsnitt ger endast en kort överblick.

13.4.1 Separation och transmutation

SKB fortsätter att stödja utvecklingen av kunskap om separation och transmutation. Om detta en dag blir verklighet skulle det vara ett sätt att minska innehållet av långlivade radioaktiva radionuklider i avfallet och på köpet även utvinna mer energi. Sverige mäktar inte ensamt driva en sådan utveckling utan det skulle kräva ett internationellt samarbete eller att någon stormakt engagerar sig. Skulle detta bli verklighet i en framtid och anläggningar för detta byggs i något land samt att deras tjänster görs tillgängliga måste vi ställa oss frågan vad detta skulle kosta och vilken typ av avfallsprodukter som vi i så fall skulle få tillbaka. Men ännu så länge är allt i ett stadium av grundläggande forskning och SKB:s inriktning är främst att följa den internationella utvecklingen på området. SKB stödjer forskning om separation och transmutation vid KTH, Uppsala universitet och Chalmers Tekniska Högskola. Forskarna där är i sin tur engagerade i ett flertal EU-projekt och kan på så vis delta i den internationella forskningen på området. Omfattningen av det stöd SKB ger till forskningen i Sverige är så vald att den ska ge en tillräcklig bredd och en tillräcklig omfattning för att vara livskraftig. För att delta i den internationella utvecklingen måste man bidra med kompetenta samarbetspartners och ha ställen inom landet där forskning på området bedrivs på en acceptabel nivå. En detaljerad redovisning av SKB:s forskningsprogram på området separation och transmutation finns i avsnitt 23.1.

13.4.2 Djupa borrhål

Idén att slutförvara högaktivt avfall i djupa borrhål har funnits i mer än 20 år och möjligheten att deponera använt bränsle på detta sätt utreddes av SKB i början av nittiotalet. Ytterligare utredningar har gjorts sedan dess utan att man egentligen funnit några uppenbara fördelar – snarare tvärtom. Slutsatsen i Fud 2001 var att inget talade för att förvar i djupa borrhål skulle öka säkerheten eller minska kostnaden för att slutförvara det använda bränslet. Likväl beslöt man sig för att fortsätta följa utvecklingen på området. En anledning till detta var att resultaten och erfarenheterna även borde kunna användas för att öka den geovetenskapliga kunskapen som är av värde för ett KBS-3-förvar på cirka 500 meters djup. Publicerade uppgifter om undersökningar i flera kilometer djupa borrhål, som blivit tillgängliga efter SKB:s senaste litteraturstudier, har sammanställts och utvärderats. Resultaten av detta redovisas kortfattat i avsnitt 23.2. Man kan konstatera att inget framkommit som förändrar den bedömning som gjordes i Fud 2001, men det kan ändå vara värt att fortsätta följa de geovetenskapliga undersökningarna av förhållandena på flera kilometers djup i berget, av samma skäl som tidigare.

14 Säkerhetsanalys

14.1 Metodik för analys av djupförvarets långsiktiga säkerhet

En översikt av säkerhetsredovisning under platsundersökningsskedet ges i SKB:s handlingsplan, se bilaga A. SKB:s arbete med säkerhetsanalyser för ett djupförvar samt metod- och modellutveckling för dessa bedrivs under platsundersökningsskedet nästan uteslutande inom ramen för de projekt som syftar till att producera säkerhetsrapporter till ansökningarna för att uppföra en inkapslingsanläggning och ett djupförvar. Säkerhetsanalysprojekten benämns SR-Can respektive SR-Site. Av särskild betydelse för Fud-program 2004 är den interimrapport för SR-Can som nyligen /14-1/ redovisats. Syftet med den rapporten är att redovisa metodiken för säkerhetsanalys inför tillämpningen i de planerade ansökningarna. Rapporten visar inte bara genomförd metodikutveckling med exempel utan även planer för hur olika frågor avses att lösas i slutrapporten för SR-Can. Myndigheterna genomför hösten 2004 en ingående granskning av interimrapporten, bland annat med hjälp av en grupp internationella experter.

En väsentlig del av all relevant information om nyligen genomförd och planerad utveckling av säkerhetsanalysmetodik och verktyg för detta finns därför i interimrapporten och upprepas inte i detalj här.

Viktiga metodfrågor som redovisas i Interimrapporten SR-Can är bland annat:

- Fep-hantering och Fep-databas.
- Val av scenarier.
- Hantering av osäkerheter.
- Sensitivitetsanalyser.
- Riskberäkningar.
- Uppfyllande av myndigheternas föreskrifter SSI FS 1998:1 samt SKIFS 2002:1.

Till grund för utvecklingen har legat, förutom behov identifierade av SKB, också synpunkter på SKB:s senaste säkerhetsredovisning SR 97 /14-2/ och på Fud-program 2001 samt krav i myndigheternas föreskrifter vad gäller säkerhetsredovisning för ett djupförvar (SSI FS 1998:1 respektive SKIFS 2001:1).

Utgångspunkten för detta kapitel är KBS-3V men det bör noteras att varianten KBS-3H med horisontell deponering av kapslarna också är föremål för studier. SKB och Posiva genomför tillsammans ett program som omfattar forskning, utveckling och demonstration av varianten KBS-3H med liggande kapslar, se avsnitt 10.7. Inom ramen för programmet planeras en analys av den långsiktiga säkerheten för KBS-3H. Denna kommer att genomföras under ledning av Posiva, med det övergripande målet att presentera en säkerhetsanalys för KBS-3H med Olkiluoto som referensplats i mitten av år 2007. Tanken är att utnyttja så mycket som möjligt av den metodik som utvecklas för säkerhetsanalysen SR-Can. Man kommer naturligtvis även att använda resultaten från Posivas eget program för forskning, utveckling och demonstration /14-3/. Till den planerade analysen hör bland annat en processrapport som fokuserar på processer som är specifika för KBS-3H. Man kommer att modellera och analysera termiska, mekaniska, gasrelaterade och kemiska processer, samt genomföra radionuklidtransportberäkningar. Vid planeringen av säkerhetsanalysen kommer planeringsrapporten /14-4/ och interimrapporten /14-1/ som tagits fram inom SR-Can liksom den planeringsrapport som Posiva kommer att ta fram för sin säkerhetsanalys för KBS-3V att utnyttjas. Exempel på moment som ingår i planeringsarbetet är att ta fram en preliminär innehållsförteckning för analysen, att identifiera de processer som är av betydelse för den långsiktiga säkerheten som är gemensamma för koncepten KBS-3H och KBS-3V eller vars beskrivningar endast behöver modifieras i liten omfattning samt att identifiera de processer som är specifika för KBS-3H. I säkerhetsanalysen kommer naturligtvis de resultat och erfarenheter som framkommer inom den forskning, tekniska utveckling och demonstration som bedrivs inom programmet att beaktas.

14.2 Integrerad modellering

Utvecklingen av många av de modellverktyg som används inom säkerhetsanalysen och resultat erhållna med dessa verktyg beskrivs i detalj under respektive avsnitt i kommande kapitel. Det gäller till exempel modellering av grundvattenflöde, av buffertens kemiska utveckling eller av inlandsisars utveckling. Nedan beskrivs utveckling av verktyg för integrerad modellering av ett antal processer som spänner över stora delar av systemet.

14.2.1 Systemutveckling

Det system av kopplade processer som styr den långsiktiga utvecklingen är komplext. I den matematiska modelleringen av djupförvarets utveckling studeras därför processsystemet med olika så kallade processmodeller, där var och en illustrerar en viss aspekt av den totala utvecklingen. Ofta hanterar dessa modeller antingen termiska, hydrauliska, mekaniska eller kemiska processer. Integration av alla aspekter av utvecklingen genomförs därefter huvudsakligen som ett resonemang kring resultaten från processmodellerna, inom ramen för en säkerhetsredovisning.

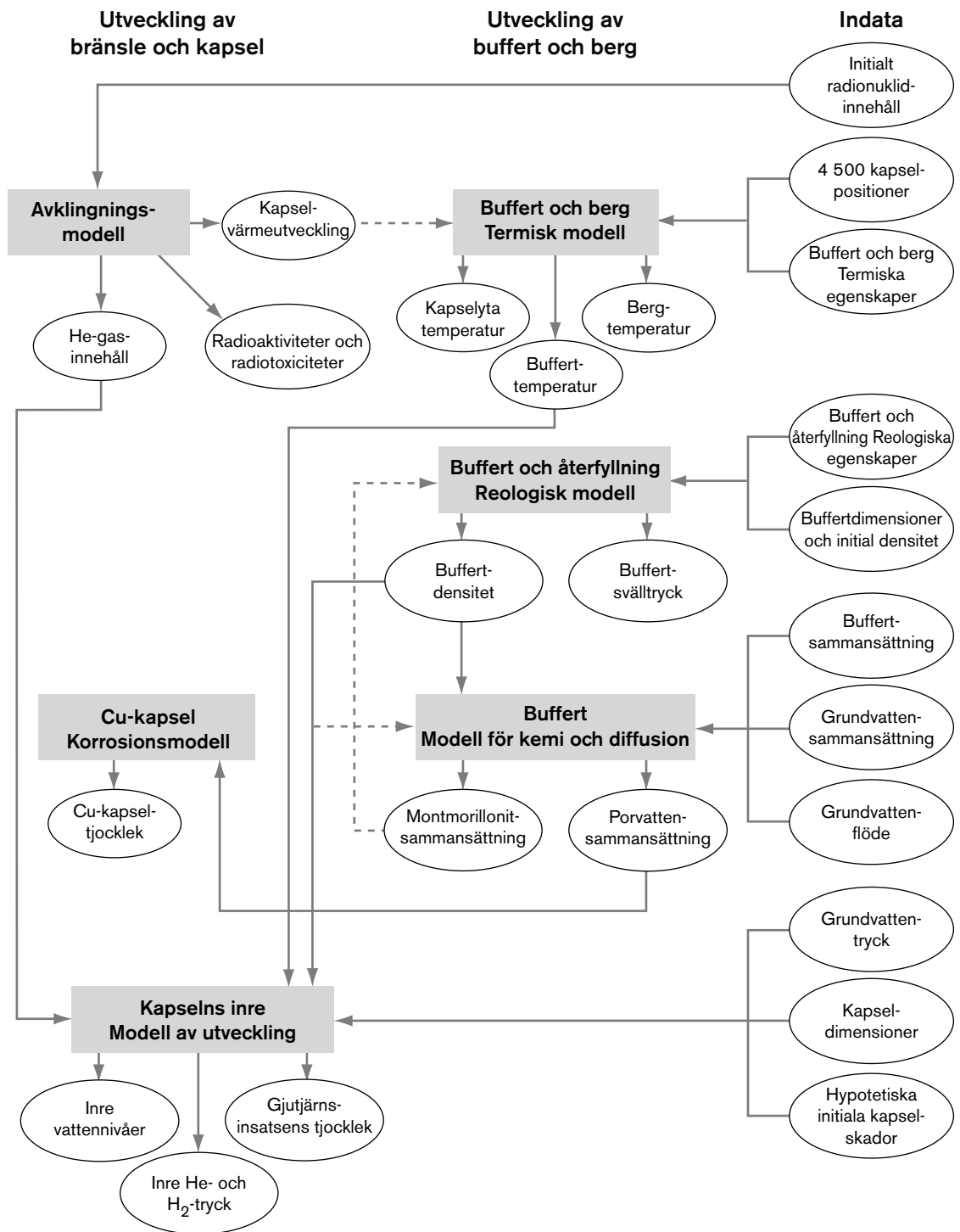
Nyligen har en systemmodell som består av flera integrerade delmodeller utvecklats, där var och en efterliknar en processmodell /14-5/. Systemet av behandlade processer är med nödvändighet förenklat. Exempelvis utesluts den kortvariga mätnadsfasen hos bufferten där kopplingen mellan processerna är stark, liksom detaljerad hydromodellering av den heterogena, sprickiga berggrunden.

Den första versionen av systemmodellen behandlar inte radionuklidtransport. En förenklad beskrivning finns även av dessa fenomen, se avsnitt 14.2.2, och kan eventuellt läggas in i framtida versioner av systemmodellen.

Ett huvudskäl för utveckling av systemmodellen är att få en integrerad behandling av de viktigaste processerna i den långsiktiga förvarsutvecklingen, vilket säkerställer att en konsistent indatabas används för modellering av alla aspekter på utvecklingen och att tidsberoende utdata från en delmodell kan användas direkt som indata till en annan. Dessutom styrs detta verktyg direkt av säkerhetsanalytikern i motsats till den tidigare situationen där ett antal spridda expertgrupper hanterade sina egna processmodeller. Flera åtgärder har vidtagits för att öka beräkningshastigheten jämfört med underliggande processmodeller. Detta tillåter snabb utvärdering av ett antal olika uppsättningar indata och möjliggör dessutom probabilistiska beräkningar. Modellen kan exekveras probabilistiskt, men ännu har mestadels deterministiska resultat tagits fram, dels eftersom databasen för probabilistiska beräkningar är ofullständig, dels eftersom det ofta inte är uppenbart att probabilistiska beräkningar är motiverade.

Andra orsaker till att utveckla modellen är att vinna insikt i den relativa betydelsen av olika processer på en övergripande nivå och att ge kvalitetssäkring i form av en oberoende uppsättning modeller för viktiga aspekter av djupförvarets utveckling. Ambitionen är emellertid inte att ersätta mera detaljerade processmodeller. Dessa kommer alltid att behövas för att fullt ut inkludera alla detaljer i mekanismerna bakom individuella processer och som en nödvändig bas för utveckling av förenklade modeller. Vidare kommer expertisen bakom utvecklingen av processmodeller alltid att behövas för att beskriva och motivera det gemensamma vetenskapliga underlaget för båda typerna av modeller.

Figur 14-1 visar uppsättningen processmodeller som har inkluderats som delmodeller i systemmodellen, och hur delmodellerna hör ihop. Ytterligare beskrivning av olika delmodeller, jämförande testresultat etc ges i /14-5/. Modellen kommer att användas som ett av flera verktyg med vilka den allmänna systemutvecklingen studeras i SR-Can projektet.

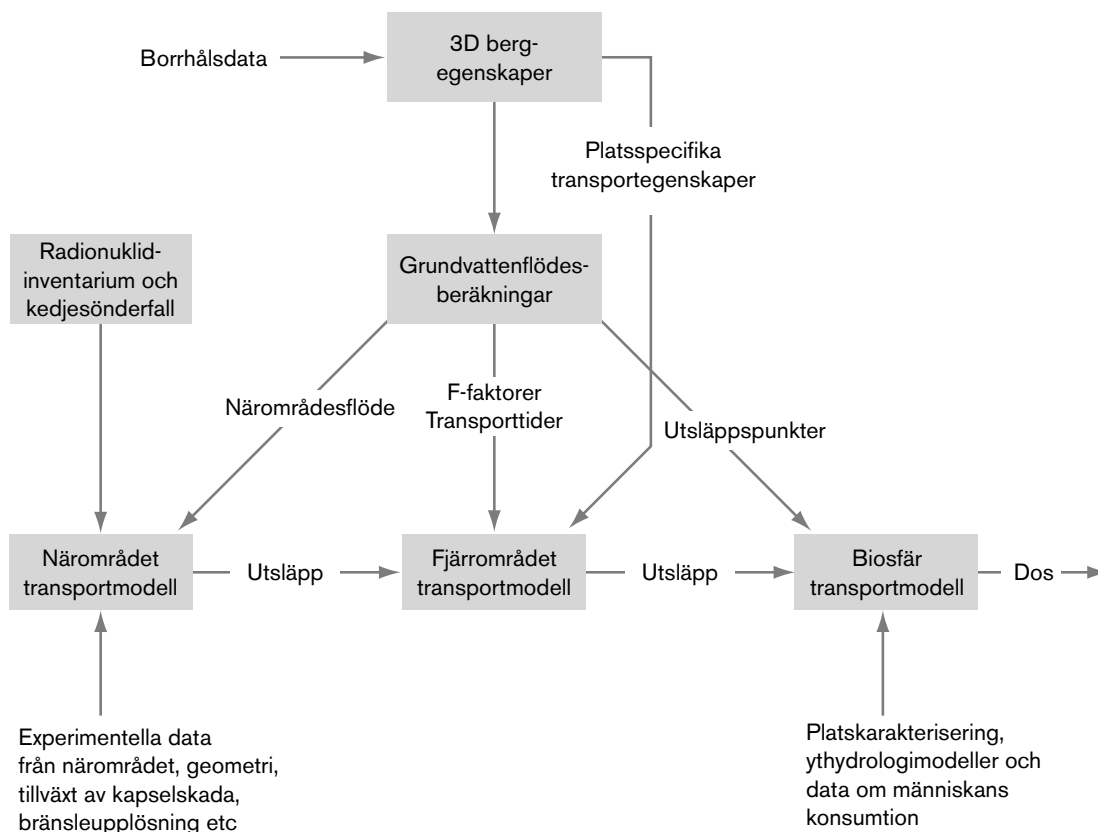


Figur 14-1. Systemmodell med delmodeller representerade som rektanglar. Indata och tidsberoende beräkningsresultat visas som ellipser. Streckade linjer representerar kopplingar som ännu inte är fullt implementerade.

14.2.2 Radionuklidtransport och dos

Radionuklidtransportberäkningar utförs för att uppskatta risken för miljö- och hälsoeffekter från ett förvar. Eftersom många av parametrarna i denna typ av beräkning antingen har en naturlig variabilitet eller är ofullständigt kända genomförs probabilistiska beräkningar, där modellparametrarna tillåts variera i enlighet med någon typ av föreskriven sannolikhetsfördelning. I SKB:s tidigare säkerhetsanalyser har transportberäkningar utförts med en probabilistisk beräkningskedja som innefattar transport genom närzonen och fjärrzonen samt dosberäkningar i biosfären. Dessa probabilistiska beräkningar utnyttjar resultat av andra simuleringar för delar av indatabasen. Figur 14-2 visar samverkan mellan de olika modeller som är avsedda att användas i SR-Can-beräkningarna, vid sidan om beräkningsmoduler för transportberäkning (för närzon, fjärrzon och biosfär). Figuren visar även hur dessa moduler är kopplade till andra beräkningsverktyg och vilka data de olika modellerna kräver. Dessa data kan ges i form av sannolikhetsfördelningar för de flesta inparametrarna. Sannolikhetsfördelningarna kan baseras på till exempel experimentella data eller på resultatet av en tidigare utförd beräkning som av olika skäl kan vara olämplig att inlemma i den probabilistiska transportberäkningskedjan.

Tidsödande grundvattenflödesberäkningar baserade på tolkningar och modelleringar av platspecifika borrhålsdata kommer att genomföras i ett separat program (Connectflow eller DarcyTools) och användas på olika sätt av transportmodellerna. Korrelerade sannolikhetsfördelningar från flödesberäkningar används som indata för radionuklidtransportmodeller för närzonen, fjärrzonen och biosfären.



Figur 14-2. Schematisk bild av olika delmodeller i radionuklidtransportberäkningen.

Nyligen har analytiska, förenklade versioner av när- och fjärrzonstransportmodeller utvecklats /14-6/. Dessa modeller använder samma indata som motsvarande numeriska modeller och doserna beräknas med hjälp av ekosystemspecifika konverteringsfaktorer. Modellerna kan exekveras probabilistiskt och ger resultat i god överensstämmelse med deterministiska och probabilistiska beräkningsfall i SR 97. En enstaka realisering med de analytiska modellerna exekveras på cirka 0,1 sekunder på en 2 GHz persondator, vilket gör dem väl lämpade för omfattande probabilistiska beräkningar. De analytiska modellerna ska användas som ett komplement till numeriska modeller i kommande säkerhetsanalyser, särskilt för tidiga, gränssättande beräkningar och för kompletterande probabilistiska beräkningar.

De följande avsnitten beskriver kortfattat plattformarna för numeriska radionuklidtransportberäkningar och numeriska modeller för närzon, fjärrzon och biosfär.

Plattformar för radionuklidtransportberäkningar

Radionuklidtransportberäkningarna i SKB:s säkerhetsanalyser har utförts med Proper-paketet (SKB 91, SR 95 och SR 97). Proper-paketet, skrivet i Fortran 77, består av ett antal delmoduler som hanterar transportberäkningen, se figur 14-2. Närzonstransportberäkningen hanteras av Proper-delmodulen Comp23 /14-7/, fjärrzonen av Farf31 /14-8/ och biosfärtransporten av Bio42. Proper-miljön har inte bara en centralstyrd kommunikation mellan de olika modulerna utan även rutiner för att genomföra deterministisk simulering och bibliotek med verktyg för numeriska beräkningar (Numlib). Dessutom innehåller miljön delmoduler för kommunikation med grundvattenflödesmodellen, viktning och summering av tidsserier (Sum41) och kommunikation med ASCII-filer utanför Proper (TS01 och Pick51).

Som ett komplement till Proper-paketet utvecklas för närvarande ett alternativt programpaket, Tensit, som kan exekveras på en persondator. Tensit ska användas parallellt med Fortran77/Unix-versionen av Proper i säkerhetsanalyserberäkningarna. PC-versionen, som bygger på samma konceptuella modeller som Proper-paketet, har utvecklats separat från Fortran77/Unix-versionen och är skrivet som ett Matlab-program. Matlab är ett vanligt förekommande verktyg inom numeriska beräkningar och erbjuder ett stort urval matematiska funktioner, ett scriptspråk och en grafisk miljö, Simulink, där modeller enkelt kan byggas och där olika delmodeller kan kopplas samman på ett enkelt och intuitivt sätt. Både Matlab och Simulink är väl spridda, både inom universitetsvärlden och industriellt, vilket är positivt då det underlättar kompetensförsörjning av programmeringskunnig personal samt medför ett beständigt underhåll av programkoden. Ett större antal användare medför rimligtvis även en ökad sannolikhet för att eventuella felaktigheter i kodens beräkningsrutiner upptäcks. Simulinks grafiska gränssnitt gör att den totala mängden programkod kan minskas. Detta i kombination med Matlabs inbyggda numeriska beräkningsrutiner, medför att granskning och vidareutveckling av de olika modellerna förenklas (särskilt för personer utanför utvecklingsgruppen).

För närvarande är närzonsberäkningen fullständigt implementerad i Matlab och Simulink, varför beräkningar motsvarande dem som hanteras av delmodulen Comp23 kan köras i Tensit. För migrationsberäkningar i fjärrzonen används en porterad version av det Fortran77-program som används i Proper med ett gränssnitt som gör att programmet kan användas som en Matlab-funktion. Biosfärmodulen har utvecklats till ett betydligt mångsidigare verktyg. Medan Propermodulen utnyttjar doskonverteringsfaktorer beräknade av ett externt program, kan Matlab-versionen antingen beräkna doskonverteringsfaktorer i förväg eller genomföra tidsberoende biosfärberäkningar som del av en probabilistisk beräkningskedja.

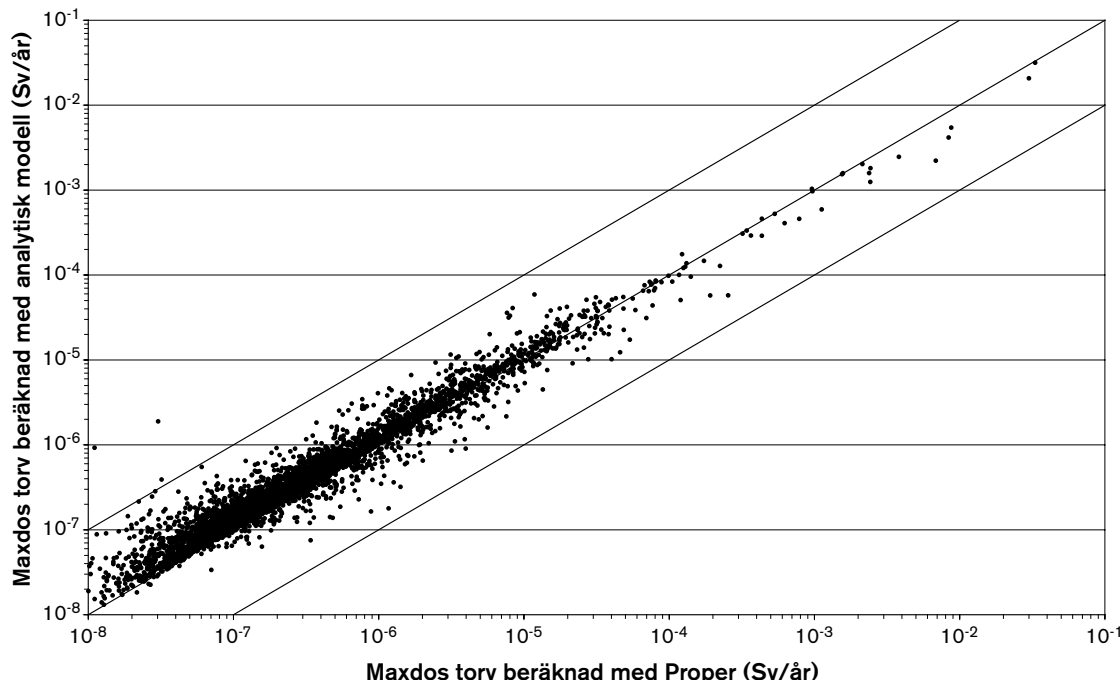
Förutom Matlab-paketet kan PC-versionen använda det kommersiellt tillgängliga riskanalysprogrammet @Risk för probabilistiska analyser. @Risk kan generera ett stort antal sannolikhetsfördelningar, utföra probabilistiska simuleringar och köra externa program som Matlab. Vidare ger kombinationen Matlab/@Risk en transparent miljö för säkerhetsanalyserberäkningar.

För närvarande är exekveringstiden för en enstaka Comp23-realiserings med Fortran77/Unix-versionen (på den 400 MHz Sun Enterprise 450 som användes i SR 97) och Matlab/PC-versionen (på en arbetsstation Intel 1700 MHz Compac Deskpro) av samma storleksordning (några minuter) för exekveringar med nio nuklider som används i probabilistiska beräkningar för SR 97. Fjärrzon- och biosfärmodulerna ger obetydliga realiseringsstider i jämförelse med närzonsmodellen. Tack vare den utpräglade porterbarheten hos Matlab-programmet (Matlab finns för många olika plattformar exempelvis Macintosh OS X och flera Unix-versioner) kan Matlab-implementering med relativt liten ansträngning, köras på en annan plattform om kapaciteten på PC-plattformen av någon anledning skulle bedömas vara otillräcklig.

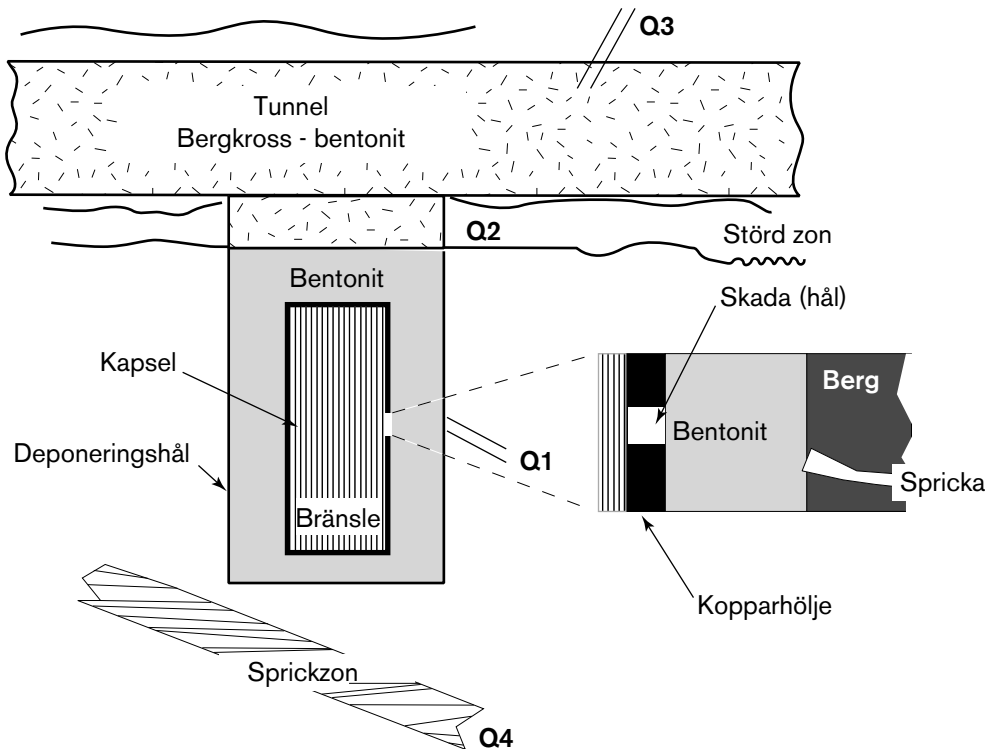
Figur 14-3 visar en jämförelse mellan doser beräknade med Proper-modulerna för radionuklidtransport och med den analytiska modellen.

Närzonsmodellen

Närzonsmodellen Comp23 ska användas i SR-Can. Detta är samma modell som användes i SR 97 och den utvecklades ursprungligen från Nucltran-programmet /14-7, 14-9/. Comp23 är en modell för multipla transportvägar som beräknar transient nuklidtransport i närzonen kring ett förvar, med hjälp av ett nätverk av resistanser och kapacitanser som kopplas samman analogt med ett elektriskt nätverk. Analytiska lösningar ingår i stället för fin diskretisering vid känsliga zoner, till exempel vid utsläppspunkten vid ett litet hål i kapseln och vid ingången till sprickor, i syfte att accelerera beräkningarna. Medan Comp23-modellen som användes i SR 97 bara kunde hantera radionuklidtransport genom diffusion, har dagens version modifierats för att kunna simulera även advektiv transport. Ytterligare en utveckling sedan SR 97 är att alla nuklider av ett visst grundämne nu kan dela grundämnets lösligheter inuti kapseln, där radionuklidkoncentrationer påtvingas löslighetsbegränsningar.



Figur 14-3. Jämförelse mellan doser beräknade med Proper-modulerna och den analytiska modellen. Maxdos upp till en miljon år efter förvarets förslutning vid utsläpp till torvmosse i 5 000 probabilistiska realiseringar. Inom de avgränsande linjerna är avvikelserna mindre än en faktor 10.



Figur 14-4. Schematisk bild av närzonen, med de transportvägar som användes i SR 97.

Figur 14-4 visar hur deponeringshålen och återfyllningen i deponeringstunneln modellerades i SR 97. I den modellen användes fyra olika flödesvägar, Q1–Q4, för gränssnittet mellan närzon och fjärrzon.

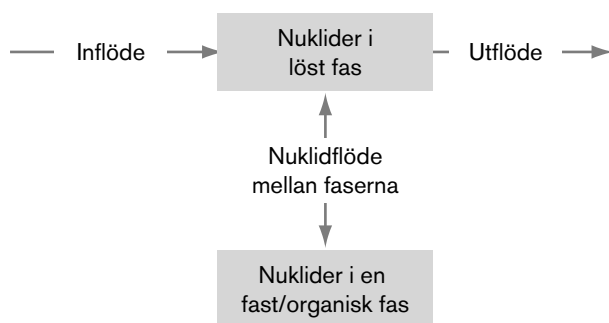
För att representera barriärsystemet genom vilket radionuklider transporteras, använder Comp23 en integrerad finit differensmetod och kompartimentkonceptet.

Fjärrzonsmodellen

Fjärrzonsmodellen för SR-Can liknar den som användes i SR 97. Denna modell, Farf31 /14-8/, beräknar transporten av vattenlösta radionuklider genom sprickigt berg, retentionen orsakad av interaktioner mellan nuklider och bergmatrisen samt kedjesönderfall.

Biosfärmodellen

Radionuklidtransport genom biosfären och doser till människor hanterades i SR 97 av Propermodulen Bio42. Denna modul baserades på nuklid- och ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorer (EDF-värden) som omvandlar nuklidutsläpp till ett ekosystem till doser. I SR 97 beräknades EDF-värdet för sex ekosystem (brunn, sjö, flod, torvmosse, odlingsjord, kust) i ett separat program /14-10/ med allmänna data för ekosystemparametrar. De olika ekosystemen representerades av så kallade kompartimentmodeller där varje "kompartiment" representerade en distinkt del av ett ekosystem. Figur 14-5 visar som exempel en torvmosse modellerad som två kompartiment, vilka representerar nuklider lösta i vatten respektive sorberade på organiskt och/eller fast material. Nuklidöverföringen mellan dessa båda kompartiment modellerades med ekosystem- och grundämnesspecifika fördelningskoefficienter (K_d). I den modellerade torvmossen, figur 14-5, sker både nuklidinflöde och -utflöde i den lösliga fasen och styrs därför av vattenbalansen. Beroende på vattenutväxlingen vid den studerade platsen kan in- och utflöde ske till andra ekosystemmodeller, inflöde ske från utsläppspunkter från geosfärens strömrör eller utflöde av nuklider ske från modelldomänen. I SR 97 beaktades emellertid endast enskilda ekosystem, med indata endast från utsläppspunkter från strömrör.



Figur 14-5. *Kompartimentmodell av en torvmosse.*

I SR-Can kommer platsen att vara bättre känd och underlaget för modellering av ekosystem och interaktioner mellan olika ekosystem vara förbättrat. Figur 14-6 visar hur en nedströms nuklidtransport kan hanteras i biosfärmodellen om vattenflödet vid platsen är känt. I skissen förutsätts nuklider komma in i en torvmosse, vilken kan modelleras som i figur 14-5, via grundvattnet. Radionuklidutflödet från denna modell visas som inflöde i, till exempel en vattendragsmodell och senare i en sjömodell etc. Till skillnad mot de modeller som användes i SR 97 kan människor exponeras för nuklider från alla modellerade ekosystem samtidigt, till exempel för radionuklider från torvförbränning, bevattning av odlingsmark från vattendrag och från förtäring av akvatiska livsmedel från en sjö.

Biosfärberäkningarna i SR 97 utfördes i ett separat program och överfördes till Proper-paketet som sannolikhetsfördelningar. I SR-Can kommer biosfärtransportberäkningen att genomföras i Matlab/Simulink-versionen av säkerhetsanalysprogrammet. Biosfärsimuleringar kan antingen genomföras som del av en probabilistisk datorberäkningskedja eller separat med nuklidutsläpp från varje realisering av när- och fjärrzonsmoduler. EDF-faktorer kommer också att beräknas i SR-Can.

Som ett komplement till de kompartimentbaserade biosfärmodeller som användes i SR 97 pågår arbete med att implementera så kallade processmodeller i biosfärssimuleringsverktyget, se avsnitt 20.4. Dessa modeller är baserade på överväganden om energi- och näringsbalanser och kan även användas för att generera indata till kompartimentmodellerna. Genom att använda Matlab/Simulink-paketet för simulering kan man använda dessa modeller i kombination med tidigare befintliga kompartimentmodeller och på så sätt genomföra mer komplexa simuleringar.



Figur 14-6. *Koppling av biosfärmoduler för radionuklidtransport.*

15 Bränsle

Det använda bränslet, som ska deponeras i förvaret, kommer från kärnkraftverk. För ett alternativ med 40 års reaktordrift uppskattas mängden BWR-bränsle till 7 200 ton och mängden PWR-bränsle till 2 300 ton /15-1/. Till detta kommer 23 ton Mox-bränsle, 20 ton bränsle från Ågestareaktorn samt en del rester från undersökningar av bränsle på Studsvik. Utbränningen kan variera från cirka 15 till 60 MWd/kgU. Skillnader i radionuklidinnehåll mellan PWR- och BWR-bränsle är marginella sett ur säkerhetsanalysens perspektiv. Mox-bränsle har högre rest-effekt 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. Därför görs bedömningarna med de bränsletyper som är mest ogynnsamma i kriticitetshänseende.

15.1 Initialtillstånd i bränsle/hårum

15.1.1 Variabler

För säkerhetsanalysen beskrivs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller inte bara själva bränslet utan även hårummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. I hårummet kommer då processer som bränsleupplösning och korrosion av gjutjärnsinsatsen att äga rum. Hårummet skulle alltså kunna ingå i endera systemdelen bränsle eller kapsel och har här inkluderats i bränslet. Variablerna definieras i tabell 15-1.

Initialtillståndet, det vill säga värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 9.2 /15-2/. I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i bränslet.

Tabell 15-1. Variabler i bränslet.

| Variabel | Definition |
|-------------------------------|---|
| Geometri | Geometrisk mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och Zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår. |
| Strålintensitet | Intensitet av α -, β -, γ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet. |
| Temperatur | Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet. |
| Hydrovariabler | Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hårum. |
| Mekaniska spänningar | Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i bränsleelementet. |
| Totalt radionuklidinventarium | Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar. |
| Gapinventarium | Förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser. |
| Materialsammansättning | De material som bränsleelementets olika delar består av, exklusive radionuklider. |
| Vattensammansättning | Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hårum. |
| Gassammansättning | Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hårum. |

15.1.2 Geometri

Djupförvaret kommer att innehålla bränsle av olika typer och geometrier.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB aviserade satsningen på EU-projektet SFS (Spent fuel stability under repository conditions) som startades i syfte att genomföra forskning kring detaljerad geometri, sprickfördelning och fissionsproduktfördelning, och utvecklingen av dessa med tiden.

Inga direkta synpunkter på detta fördes fram av myndigheterna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Projektet SFS är ännu inte avslutat. En slutlig utvärdering och rapportering av projektet kommer att vara tillgänglig först i slutet av 2004. SKB har låtit en oberoende expert göra en kritisk granskning av dessa frågor /15-3/. Slutsatserna är att det för närvarande inte finns anledning att anta att bränslets geometri kommer att förändras på ett avgörande sätt över långa tider.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.1.3 Strålintensitet

Strålintensiteten beror av radioaktiviteten, det vill säga inventariet av radionuklider och bränslets geometri. Båda dessa är väl kända och dosraten kan beräknas med tillräcklig noggrannhet för säkerhetsanalysens behov.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 fanns inget forskningsprogram om denna process, och inga direkta synpunkter på detta framfördes i granskningen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.1.4 Temperatur

Det kritiska gränssnittet i kapseln är övergången mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet. Koppars emissivitet är av avgörande betydelse.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Värmeöverföringen mellan kapselytorna, framför allt koppars emittans, behöver bestämmas för att bättre beräkningar av temperaturfördelningen inne i kapseln ska kunna genomföras.

SKI saknar en mer detaljerad beskrivning av studierna av emissivitet och temperaturutveckling i kapseln, men ser positivt på att SKB planerar använda sådana studier för att ta fram konstruktionskrav för kapselytorna.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Uppsala universitet har mätt upp emittansen på ett mindre antal kopparprover som tagits från de delar av kapslarna vilka genomgått alla stegen i tillverkningsprocessen, inklusive förslutningssvetsen. Trots att proverna visade upp för ögat tydlig oxidation var emissiviteten i infrarödområdet låg (0,06–0,11). Värdena förväntas inte förändras under den tid det tar att nå full vattenmättnad i bufferten i deponeringshålet. Efter full vattenmättnad saknar emittansen betydelse.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.1.5 Hydrovariabler

Hydrovariablerna, det vill säga vattentryck, vattenflöden och gasflöden är inte relevanta att beskriva initialt, eftersom kapseln förutsätts vara intakt.

15.1.6 Mekaniska spänningar

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

En viss insats planerades inom ramen för EU-projektet SFS där även SKB medverkar, se avsnitt 15.1.2. Inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.1.7 Totalt radionuklidinventarium

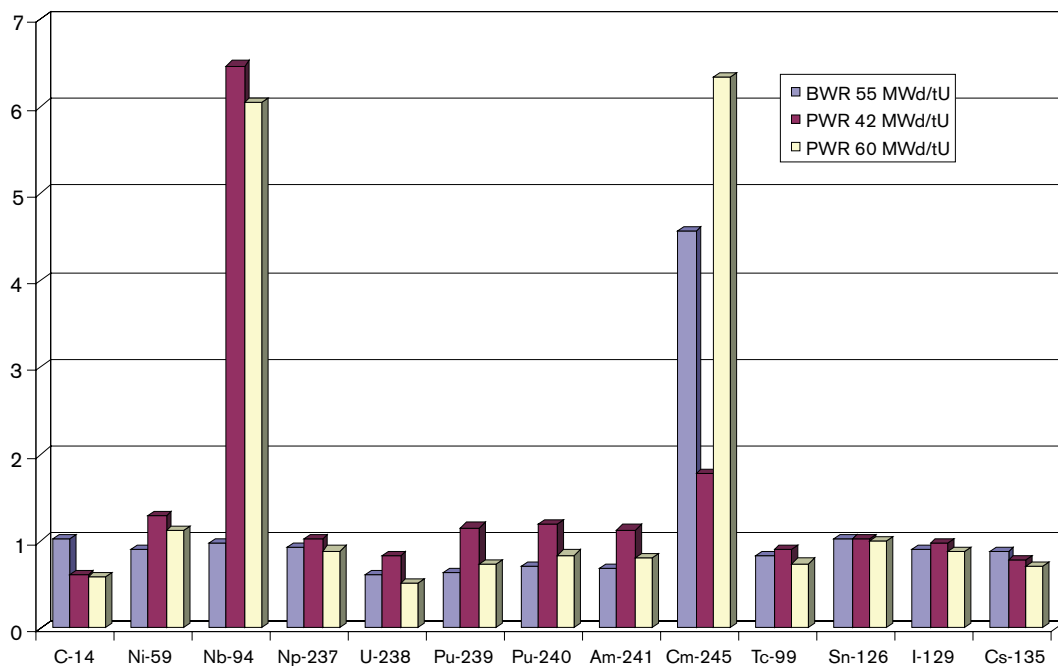
Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI har efterlyst en validering av beräkningsmodeller för vissa nuklider (till exempel ^{36}Cl , ^{79}Se och ^{126}Sn) samt en redovisning av betydelsen av andra utbränningsgrader och andra bränsletyper, till exempel Mox-bränsle. SKI begär också redovisning av total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

I SR 97 beräknades radionuklidinventarier för utbränningar på 38 och 55 MWd/kgU för BWR-bränsle och för 42 och 60 MWd/kgU för PWR. Osäkerheterna i beräkningarna diskuteras i /15-4/. I beräkningarna för SR 97 användes dock bara inventarier från BWR-bränsle med utbränningen 38 MWd/kgU. Skillnaderna i nuklidinventarium med avseende på utbränning är ofta liten. Figur 15-1 visar inventariet av radionuklider för olika utbränningar (normaliserat mot BWR 38 och korrekterat för resteffekt). Tabell 15-2 visar en jämförelse av de beräknade inventarierna av radionuklider i SR 97, i schweiziska Project Opalinus och i belgiska Safir-2.

Det framgår klart av underlaget att varken antagen utbränningsgrad eller beräkningsverktyg har någon avgörande inverkan på det beräknade inventariet.



Figur 15-1. Inventarium av radionuklider normaliserat mot resteffekt och korrigerat för resteffekt 30 år efter uttag ur reaktor.

Tabell 15-2. Jämförelse av beräknade inventarier (SKB:s värden är interpolerade).

| Nuklid | Nagra PWR-48 | SKB PWR-48 | Safir PWR-45 |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ¹⁴ C | 6,40 10 ¹⁰ | 4,20 10 ¹⁰ | 1,93 10 ¹⁰ |
| ³⁶ Cl | 1,10 10 ⁹ | 1,16 10 ⁹ | 2,75 10 ⁹ |
| ⁶⁰ Co | 4,70 10 ¹¹ | 2,97 10 ¹² | |
| ⁵⁹ Ni | 8,00 10 ¹⁰ | 1,52 10 ¹¹ | 1,60 10 ¹¹ |
| ⁶³ Ni | 8,50 10 ¹² | 1,70 10 ¹³ | 1,75 10 ¹³ |
| ⁷⁹ Se | | 3,38 10 ⁹ | 2,04 10 ¹⁰ |
| ⁸⁵ Kr | 1,70 10 ¹⁴ | 3,20 10 ¹³ | |
| ⁹⁰ Sr | 1,40 10 ¹⁵ | 1,36 10 ¹⁵ | 1,06 10 ¹⁵ |
| ⁹⁹ Tc | 7,00 10 ¹¹ | 6,75 10 ¹¹ | 6,29 10 ¹¹ |
| ¹²⁹ I | 1,70 10 ⁹ | 1,73 10 ⁹ | 1,61 10 ⁹ |
| ¹³⁵ Cs | 2,50 10 ¹⁰ | 2,19 10 ¹⁰ | 2,17 10 ¹⁰ |
| ¹³⁷ Cs | 2,20 10 ¹⁵ | 2,27 10 ¹⁵ | 1,62 10 ¹⁵ |
| ²³⁰ Th | 2,20 10 ⁷ | | 5,42 10 ⁶ |
| ²³² U | 1,30 10 ⁸ | | |
| ²³⁴ U | 6,40 10 ¹⁰ | 4,98 10 ¹⁰ | 2,17 10 ¹⁰ |
| ²³⁵ U | 6,90 10 ⁸ | 4,80 10 ⁸ | 5,64 10 ⁸ |
| ²³⁸ U | 1,10 10 ¹⁰ | 1,15 10 ¹⁰ | 1,17 10 ¹⁰ |
| ²³⁷ Np | 2,00 10 ¹⁰ | 2,05 10 ¹⁰ | 1,97 10 ¹⁰ |
| ²³⁸ Pu | 1,50 10 ¹⁴ | 1,65 10 ¹⁴ | 1,21 10 ¹⁴ |
| ²³⁹ Pu | 1,40 10 ¹³ | 1,30 10 ¹³ | 1,34 10 ¹³ |
| ²⁴⁰ Pu | 2,30 10 ¹³ | 1,74 10 ¹³ | 2,17 10 ¹³ |
| ²⁴¹ Pu | 9,40 10 ¹⁴ | 1,09 10 ¹⁵ | 5,86 10 ¹⁴ |
| ²⁴² Pu | 1,10 10 ¹¹ | 1,48 10 ¹¹ | 1,11 10 ¹¹ |
| ²⁴¹ Am | 1,80 10 ¹⁴ | 2,12 10 ¹⁴ | 1,95 10 ¹⁴ |
| ²⁴² Cm | 3,30 10 ¹¹ | 4,21 10 ¹¹ | |
| ²⁴⁴ Cm | 4,80 10 ¹³ | 1,00 10 ¹⁴ | 3,25 10 ¹³ |

Program

Tanken är att komplettera rapporten /15-4/ med uppgifter om Mox-bränsle och eventuellt någon annan typ av bränsle. Alternativet vore att göra en ny beräkning av nuklidinnehåll, aktivitet och resteffekt för ”standard BWR och PWR” samt Mox, men det är osäkert om det skulle ge någon ytterligare information. En fördel vore dock att beräkningarna görs på samma sätt och att det ger ett nytt jämförelsematerial.

För att kunna göra alla olika typer av beräkningar vilka kommer att behövas är det viktigt att definiera en modellkapsel med ett standardinnehåll som gör att resteffekten i kapseln blir 1 700 W.

15.1.8 Gapinventarium

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Försök i vätgasmiljö med bränslekutsar med varierande utbränning och bestrålningshistoria planerades. Om möjligt skulle kutsar användas där utsläppet av fissionsgas redan hade bestämts.

SKI föreslog studier av förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Försök där en vätgasmättad lösning trycks igenom bränslekutsar visade sig vara komplicerade och kräva stora resurser. De är därför fortfarande under planering och utveckling. Olika metoder att täta bränslekutsar har testats under perioden, och analysmetoder för vissa lösliga radionuklider har redovisats som förberedelse till en mer systematisk studie.

Program

Metoden behöver testas ytterligare. Om resultaten blir lovande ska en systematisk studie av gapinventarium som funktion av utbränning och andra bränsleparametrar startas.

15.1.9 Materialsammansättning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB beslöt att göra en studie av betydelsen av icke radioaktiva fissionsprodukter före nästa säkerhetsanalys. Inga direkta synpunkter på detta fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Inriktningen från Fud 2001 kvarstår.

15.1.10 Vattensammansättning

Vid deponeringsförhållanden där vatten förekommer som ånga, se avsnitt 15.1.11 nedan.

15.1.11 Gassammansättning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 ingick inget forskningsprogram för detta område, och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

I tidigare forskningsprogram har den största mängden vatten i en kapsel angetts till 50 gram. Detta kan vara en optimistisk siffra och 600 gram har nu angivits som en realistisk övre gräns.

Program

Konsekvenserna av att mer vatten förs in i kapseln måste utredas. Genom att fylla kapseln med argon (avsnitt 8.1.1) ändras gassammansättningen inne i kapseln från luft och vattenånga till en ädelgas och vattenånga, se även avsnitt 15.2.9.

15.2 Processer i bränsle/hålrums

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.

15.2.1 Översikt av processer

Radionukliderna i bränslet kommer med tiden att omvandlas till ickeradioaktiva ämnen genom radioaktivt sönderfall. 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 kapslingsrör i bränslet.

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, och 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 själv- underhållande.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i bränslet.

15.2.2 Radioaktivt sönderfall

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB beslöt att genomföra en kvalitetsgranskning av data för halveringstider för samtliga radionuklider som är aktuella i säkerhetsanalysen.

Inga direkta synpunkter på detta fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Kvalitetsgranskningen av data för halveringstider för samtliga radionuklider som är aktuella i säkerhetsanalysen kommer, som uppgavs redan i Fud 2001, att genomföras till nästa säkerhetsanalys, det vill säga SR-Can.

15.2.3 Stråldämpning/värmealstring

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 ingick inget forskningsprogram för detta område och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.2.4 Inducerad fission (kriticitet)

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB beslöt fortsätta genomföra utvärderingen av osäkerheter i nödvändiga data för att kunna ta hänsyn till lantaniderna i bränslet vid bedömning av riskerna för kriticitet.

SKI framhöll att man ser positivt på att SKB fortsätter utvärderingen av osäkerheterna i bedömningen av kriticitet. SKI höll dock med SKB om att kriticitet inte är trolig, förutsatt att bränslet är tillräckligt utbränt och att geometrin inte förändras.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Genomförda kriticitetsstudier visar att man med nuvarande kunskap och rimliga uppskattningar av osäkerheter kan visa med hjälp av utbränningskreditering att kriticitet i bränslet i kapseln inte kan uppstå /15-5/.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.2.5 Värmetransport

Behandlas i avsnitt 15.1.4.

15.2.6 Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation

Processen är starkt kopplad till flera andra processer. Processerna behandlas samlat i avsnitt 16.2.

15.2.7 Termisk expansion/kapslingsbrott

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 ingick inget forskningsprogram för detta område och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.2.8 Advektion och diffusion

Vattenlösta ämnen i kapselns inre kan transporteras genom advektion och diffusion. Dessa processer diskuteras inte explicit, utan behandlas (ofta pessimistiskt förenklat) integrerat med andra processer. I avsnitt 18.3 behandlas transport av radionuklider i närområdet.

15.2.9 Restgasradiolys/syrabildning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 ingick inget forskningsprogram för detta område, och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Kapslarna kan komma att innehålla mer vatten (600 gram) än vad man tidigare antagit (50 gram).

Program

Radiolysberäkningar kommer att genomföras för att bestämma om kapseln måste fyllas med en ädelgas för att förhindra radiolytisk bildning av salpetersyra.

15.2.10 Vattenradiolys

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB beslöt att studera järnkorrosion i initialt syrefritt vatten under gammabestrålning. Inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Undersökningen av järnkorrosion i initialt syrefritt vatten under gammabestrålning pågår fortfarande och kommer att avslutas under 2005, se även avsnitt 16.2.8.

15.2.11 Metallkorrosion

Avsnittet avser korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar på bränslet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 ingick inget forskningsprogram för detta område, och inga direkta synpunkter fördes fram i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

15.2.12 Bränsleupplösning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Både SKI och Kasam anser att bränsleprogrammet har utvecklats positivt under de senaste åren och i stort sett bedrivits ändamålsenligt i förhållande till säkerhetsanalysens behov. De resultat som SKB hittills redovisat ger förutsättningar för utveckling av en trovärdig och realistisk bränslemodell, som medger en betydande barriärfunktion. SKI anser att det behövs fler experiment och bättre modeller som förklarar resultaten av experimenten. SKB bör studera hur bränsleupplösningen påverkas av olika grad av exponering (för grundvatten) och skador på kapsel och buffert. SKB bör fråga sig om det är möjligt att tillgodoräkna sig vätgasen från korrosion för mycket långa tider i säkerhetsanalysen. SKI saknar en diskussion om inverkan av andra grundvattenkemiska parametrar (salinitet, pH, karbonathalt etc) och huruvida dessa täcks in tillräckligt väl av det experimentella programmet. SKI välkomnar att SKB tagit initiativ till att få fram bättre experimentellt underlag till "instant release". Kasam bedömer att forskningsprogrammet om bränsleupplösning, som från början hade en allmänt orienterande karaktär, behöver fokuseras på de förhållanden som enligt gjorda analyser kommer att förekomma inne i kapseln.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Resultaten som beskrivs här kommer från SKB:s eget forskningsprogram och från vårt deltagande i två projekt inom EU:s femte ramprogram (SFS och InCan).

Bränslelakning under olika redoxförhållanden

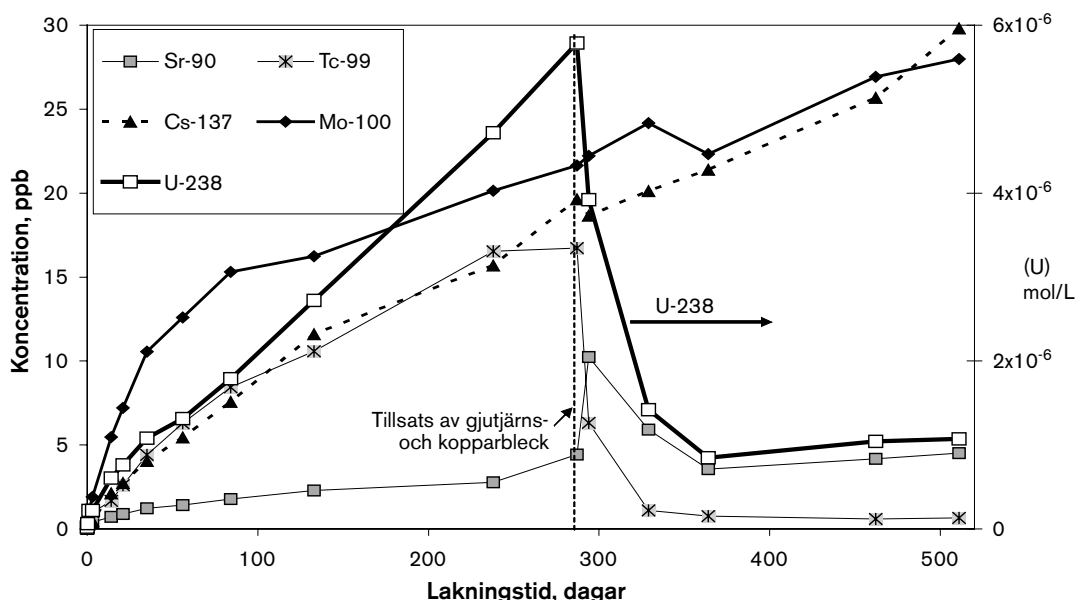
Redoxförhållandet är den viktigaste faktorn för bränsleupplösning, och under senare år har särskild uppmärksamhet ägnats åt detta. Mätningarna av redoxpotentialen har bidragit till att vi bättre förstår innebörden av uttrycket "anoxiska förhållanden" och de svårigheter som är

förbundna med att efterlikna förvarets miljö i laboratoriet. Syre finns i luften omkring oss men i de anoxiska experimenten måste partialtrycket för syre vara i det närmaste obefintligt. Detta är svårt att åstadkomma i praktiken. Spår av syre tenderar att diffundera in på grund av den stora skillnaden i partialtryck utanför och innanför experimentet. Trots spolning med inert gas eller användning av handsboxar fyllda med inert gas tenderar förhållandena i experimenten att bli mer oxiderande än i förvaret.

För att kunna urskilja effekten av radiolytisk oxidation från strålningen i experiment med använt bränsle är det helt nödvändigt att få ner den störande inverkan av syreföreningar. Först då kan man börja observera inverkan av olika reducerande komponenter. Resultat från ett experiment med upplösning av en bränslepinne i argonatmosfär redovisas i /15-6/. Användningen av metallrör, glas-metallsvetsningar och bättre tätningar i mätsystemet minskade indiffusionen av förorenande syre. Man kunde då observera hur radiolysen ensam bidrar till en oxidativ upplösning av bränslet. Efter 280 dagar tillsattes två små metallfolier av järn och koppar för att simulera inverkan av kapselns olika material. Fissionsprodukterna cesium, molybden och strontium fortsatte att laka ut (figur 15-2), medan halterna av uran, neptunium och teknetium föll påtagligt. Detta visar att trots den starka strålningen förmår kontakten med järn att skapa reducerande förhållanden.

Två andra sätt att undvika förorening med luftsyre har också prövats: användningen av syrefälla respektive inert gas under högt tryck /15-7/. I det första fallet placerades en syrefälla med mättad järn(II)karbonatlösning i samma slutna inertgasspolade utrymme som testkärlet /15-8/. I det andra fallet användes ett kraftigt och väl förseglat tryckkärl där eventuella läckage lätt kan kontrolleras via förändringar i trycket. Inga läckage får tolereras ty försök har visat att även om inert gas strömmar ut från kärlet är det inte uteslutet att syre kan diffundera in uppströms /15-9/.

Beteckningen "reducerande förhållanden" bör inte användas urskiljningslöst för alla experiment med vätgasmättade lösningar. Visserligen är vätgasen potentiellt kraftigt reducerande **men** också kinetiskt trög vid normala temperaturer. Detta, liksom betydelsen av de negativa redox-potentialer som uppmäts i vätgaslösningar, diskuteras i /15-9/.



Figur 15-2. Uppmätta halter av ^{238}U och fissionsprodukterna ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc och ^{100}Mo som funktion av laktid. Halterna av ^{238}U visas vid höger axel i mol/l. Den vertikala streckade linjen visar tidpunkt för införsel av järn- och kopparelektroder (var och en med en yta på cirka 30 mm^2).

I samarbete med Posiva har en studie av mekanismen för upplösning av föroxiderad gadolinium-dopad urandioxid undersökts /15-10/. Resultaten visar att utsläpp av sexvärt uran i lösningen orsakar en ökning av gitterparametern för urandioxid, vilket tyder på att hela matrisen blir anrikad på fyrvärt uran.

I EU-projektet In Can Processes (InCan) studerade man upplösningen av urandioxid med hjälp av isotoputspädning. Med denna metod kan man mäta upplösningshastigheten även om utfällning förekommer /15-11/.

Under oxiderande förhållanden visade sig obestrålad urandioxid från olika leverantörer ha olika upplösningshastigheter och ge olika högsta halter uran i lösning. Vi tror att detta kan vara ett resultat av olikheter i sintringsprocessen. Halterna efter längre exponeringar låg mellan 9 och 13 ppm och visade tydliga tecken på samtidig upplösning och utfällning vid kvasistationärt tillstånd. Korrosionsexperiment vid aktivt reducerande förhållanden visade upp en initial puls följt av utfällning och låga nivåer på uranhalt efter några dagar. Halten uran i lösning var då mindre än $4 \cdot 10^{-11}$ mol/l. Detta är lägre än vad tillgängliga data för urans löslighet förutsäger.

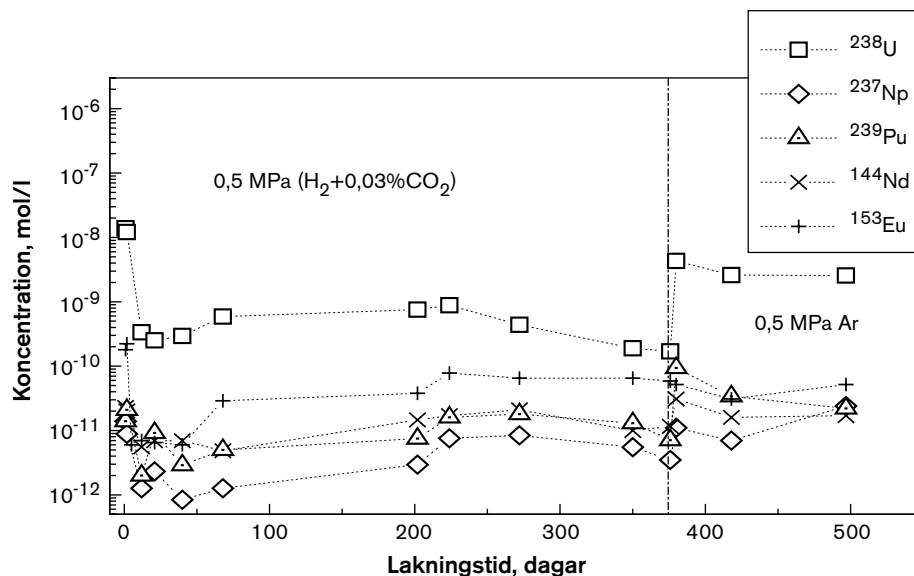
Experiment gjordes också med urandioxid som innehöll 5 procent och 10 procent uran-233. Dessa material har en alfaaktivitet motsvarande använt bränsle 10 000 och 3 000 år efter deponering i djupförvar. Man har antagit att bränslekorrosionen under reducerande förhållanden kan påverkas av radiolys av vattnet på grund av alfastrålningen. Radiolysen skulle skapa lokala oxiderande förhållanden vid bränsleytan och därigenom öka upplösningshastigheten. I de experiment som genomfördes inom ramen för InCan-projektet såg man inga tecken på detta. Alla prover hade uranhalt mindre än 0,02 ppb, det vill säga samma som för odopade prover. Genom att tillsätta en lösning anrikad i uran-235 kunde man se att uranhalt i ett experiment som varade en månad var omkring 0,005 ppb.

Experiment gjordes också med bränsleprov från tidigare studier. Proverna jämviktades i sex månader i grundvatten med låg jonstyrka i tio bars vätgasatmosfär för att ge anaeroba och helst reducerande förhållanden. Lösningen byttes sedan mot färskt syrefritt grundvatten och en lösning anrikad i uran-235 tillsattes. Tillsatsen var större än önskvärt (totalhalten uran efter tillsats var 40 till 125 ppb) och utfällning startade omedelbart. Efter en vecka var uranhaltarna 20 till 50 ppb, och efter 18 dagar var de 6 till 15 ppb. Trots att utfällning pågick, kunde man se av förändringarna i isotopförhållanden att det utbrända bränslet fortsatte att lösas upp med en hastighet av 0,2 till 0,3 ppb per dag. Detta kan bero på effekter av beta- och gammastrålning.

Inverkan av vätgas på upplösning av bränsle

Vätgas förväntas finnas i stora mängder under långa tidsperioder i en skadad kapsel med begränsat hål. Orsaken är den relativt sett högre hastigheten för vätgasproduktion från anoxisk järnkorrosion jämfört med masstransport genom diffusion utanför /15-12, 15-13/. De första resultaten från bränsleupplösning i rostfria autoklaver under 50 bar vätgastryck visade en stor påverkan av vätgas vid bränsleupplösning /15-14/. Halterna aktinider och fissionsprodukter under hela försöksperioden var mycket låga och konstanta inom analytiska felgränser, vilket tyder på mycket låga bränsleupplösningshastigheter. Även om halterna upplöst vätgas i autoklaven (cirka 40 mM) var många storleksordningar högre än halterna redoxkänsliga radionuklider och radiolytiska oxidanter, förväntas vätgas vara kemisk trög vid låga temperaturer. Det finns till exempel uppgifter i litteraturen som tyder på att sexvärt uran /15-9/, sjuvärt teknetium /15-15/ och femvärt neptunium /15-16/ inte reduceras i närvaro av löst vätgas vid rumstemperatur.

För att undvika all kontakt av laktlösningen med metallytor och slippa diskussion angående deras påverkan, genomfördes ett nytt försök i autoklaver med inre kvartsytor under fem bar vätgastryck /15-17/. Resultat från analyser av halterna aktinider och lantanider i lösningsprover tagna vid olika tidpunkter (figur 15-3) visar liknande värden som i den rostfria autoklaven.



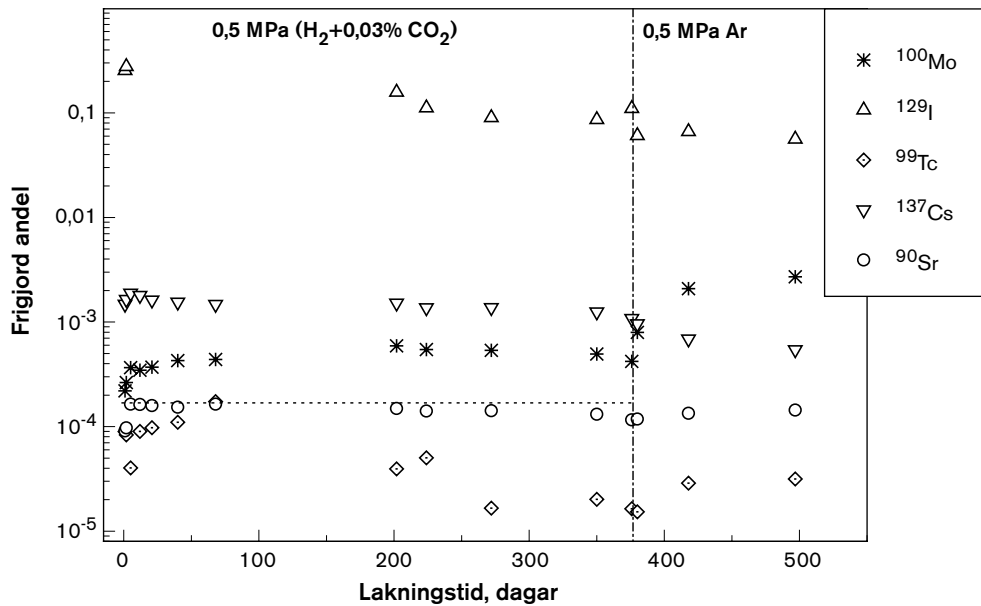
Figur 15-3. Uppmätta halter av aktinider (U, Pu, Np) och lantanider (Eu, Nd) som funktion av tiden för lakning av använt bränslepulver i en 10 mM NaCl, 2 mM NaHCO₃-lösning och antingen 0,5 MPa vätgas blandad med 0,03 procent koldioxid eller enbart 0,5 MPa argon.

Undersökning av beteendet hos redoxkänsliga nuklider som uran, teknetium och neptunium under de första dagarna (som missades förr) visade att deras redan låga starthalter minskade med tiden. Detta tyder på att de reduceras, vilket märks även i andra studier /15-18, 15-19/. Att endast låga halter radionuklider uppmättes i autoklavsköljningar /15-19/, tyder på att denna reduktion sker vid bränslets yta.

Ett annat mål med studien var att följa och förstå vad som händer med syre som produceras från vattenradiolys i vätgasmättade lösningar. Ett gasprov som togs från autoklaven efter 356 dagar och analyserades med masspektrometri visade syrehalter under detektionsgränsen (cirka 50 ppm eller 5·10⁻⁸ mol/l). Samma resultat visade en annan och oberoende studie /15-20/. När man jämför dessa data med de höga syrehalterna som uppmättes i liknande försök och under liknande tidsperioder /15-21/ men under argonatmosfär (figur 15-7) samt de extremt låga halterna uran och andra experimentella observationer kommer man till slutsatsen att radiolytiska oxidanter måste förbrukas av vätgas under sådana förhållanden och att ingen mätbar oxidativ upplösning av bränsle sker /15-17/. Detta bekräftas från en analys av frigjord andel av fissionsprodukter som till exempel strontium-90 (figur 15-4). Detta märktes inte i rostfria autoklaver och en förklaring kan vara att trots alla ansträngningar att undvika luftkontamination visade gasanalysen att det fanns kväve i autoklaven /15-17/. Men eftersom motsvarande syremängder skulle ha orsakat en nästan tiopotens högre ökning av halterna strontium-90 om syret skulle ha förbrukats enbart för att oxidera bränsleytan, tyder detta på att upplöst vätgas förbrukar inte bara radiolytiska oxidanter utan också syret från luftkontaminationen.

Alla dessa och andra experimentella data tyder på att vätgas måste vara aktiverad under försöksförhållanden för att kunna förbruka oxidanter från radiolys och syre från luftkontamination, samt orsaka reduktion av radionuklider.

Det finns två möjliga vägar till aktivering av vätgas under försöksförhållanden: antingen genom reaktioner med radikaler från strålningens radiolys eller genom påverkan av bränsleytor (uranoxidtytor och/eller metalliska partiklar i bränslet).



Figur 15-4. Frigjord andel av fissionsprodukterna Sr, Cs, I, Tc och Mo som funktion av tiden för lakning av använt bränsle i pulverform i en 10 mM NaCl, 2 mM NaHCO₃-lösning med antingen 0,5 MPa vätgas blandad med 0,03 procent koldioxid eller enbart 0,5 MPa argon.

Från enbart försök med använt bränsle i vätgasmättade lösningar är det svårt att avgöra den relativa betydelsen av dessa olika faktorer eller deras kombinerade effekter. Slutsatser kan bara nås angående förbrukning av de oxidanter som vattenradiolys producerar genom att reagera med upplöst vätgas eller med bränsleytan. För att separera och kvantifiera bidragen till vätgasens kemiska aktivering är det nödvändigt att separat studera effekten av rena ytor av utarmad urandioxid eller metalliska partiklar i vätgaslösningar och – i andra studier – effekten av olika typer av strålning i vätgaslösningar. En del nya resultat från sådana studier i litteraturen samt från det experimentella programmet diskuteras nedan.

Nyligen utförda studier av vattenradiolys med gammastrålning visar att för vätgashalter över en viss nivå, uppkommer inga mätbara mängder av oxidanter som till exempel väteperoxid i lösningen /15-22, 15-23/. Detta förklaras med att vätgasmolekyler deltar i reaktioner med starkt oxiderande radikaler som till exempel OH. Effekten av alfastrålning på vätgasaktivering i lösning förväntas vara mindre, men nästan ingen effekt av vätgas noteras i experimentella data från /15-23/.

Med hjälp av radiolysmodeller kan man räkna ut en minskning av oxidantproduktion i vätgasmättade lösningar orsakad av blandad strålning (α , β , γ) /15-24, 15-25, 15-26/. Även utan att ta hänsyn till påverkan av ytor får man fram mycket låga bränsleupplösningshastigheter. En modelleringsstudie, där man även tar hänsyn till närvaro av järn och påverkan av bränsleytor på uranreduktion, visar på en mycket låg bränsleupplösning /15-27/.

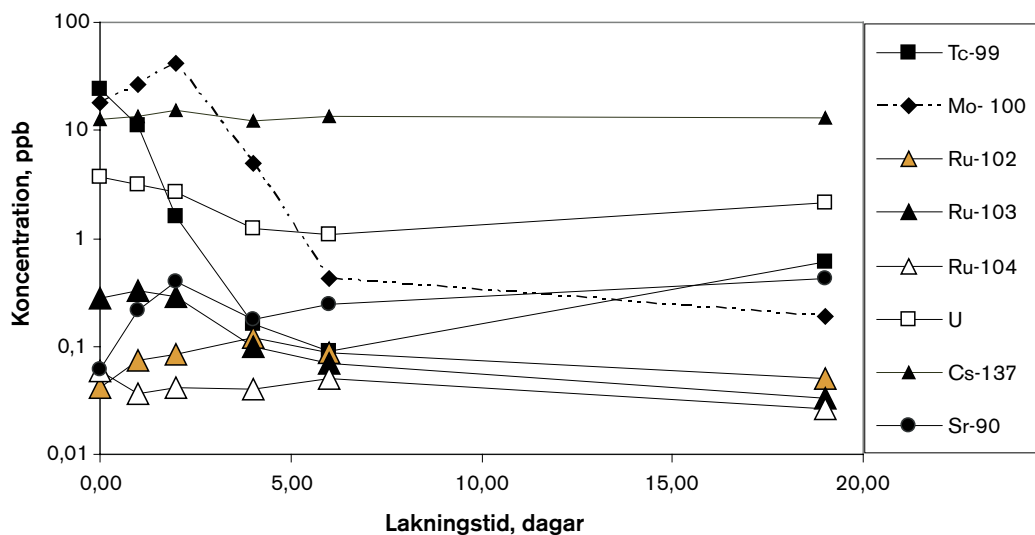
Effekten av vätgas som noteras i de experimentella studierna är svår att förklara med bara en minskning av halterna radiolysoxidanter genom reaktioner med vätgas i lösning. För att förklara till exempel reduktion av radionuklider under bränsleupplösning, syrehalter under detektionsgräns efter långa tidsperioder samt en reduktion av urandioxidytan efter försök med gamma-radiolys /15-28/ eller alfaradiolys /15-29/ i vätgaslösningar, måste eventuellt hänsyn tas också till påverkan av ytor. Resultat från en studie av effekten av olika typer av strålning på vatten sorberat på urandioxidtytor /15-30/ tyder på att ytorna starkt påverkar radiolys av sorberat vatten. Den nya kunskapen om den kombinerade effekten av ytor och strålning kan bidra till förståelse av processerna och en bättre modellering av experimentella data.

Den katalytiska effekten av urandioxid på vätgasreduktion studeras experimentellt. Resultat har nyligen erhållits från försök med utarmad urandioxid och vätgas /15-9/. Som oxidanter användes upplösta karbonatkomplex av sexvärt uran. Resultaten visade att U(VI)-halten i bikarbonatlösningar med vätgas bara minskade när man introducerade urandioxidtytor. Försöken försvårades på grund av sorption av uran(VI)karbonat på urandioxidtytor. Detta undersöktes i en separat studie /15-31/.

Det finns litteratordata som visar att toriumdioxidtytor dissocierar vätgasmolekyler till atomer /15-32/. En annan studie med PVT-metoden (Pressure-Volume-Temperature) /15-33/ visar att plutoniumdioxid katalyserar reaktionen av vätgas med syrgas för att bilda vatten vid rums-temperatur. Samma metod användes vid Studsvik för att undersöka urandioxid, som till skillnad från plutoniumdioxid eller toriumdioxid är mycket känslig för syreoxidation. På grund av PVT-metodens krav på att arbeta med totala tryck runt 0,1 atm kunde ingen slutsats angående vattenbildning dras vid så pass låga vätgashalter /15-34/. Samtidigt tyder alla experimentella data på en mycket starkare effekt av vätgas i närvaro av strålning än med bara urandioxid.

Metalliska partiklar innehållande platinagruppens metaller samt molybden och teknetium extraherades selektivt från använt bränsle med ickeoxiderande reagens (fosforsyra istället för salpetersyra), detta för att undvika upplösning av de mest aktiva metallerna och ändringar i sammansättningen. Helt blanka partiklar isolerades, till skillnad från den svarta fällningen som samlas under bränsleupplösning med salpetersyra. Upplösningshastigheten av olika komponenter från dessa partiklar under olika redoxförhållanden (ren argon och argon med tio procent vätgas) har bestämts och publicerats /15-35/.

I figur 15-5 visas data från lakning av metalliska partiklar i lösningar innehållande cirka 0,08 mM upplöst vätgas (tio procent vätgas i argon). Efter den långsamma uppmätningen av lösningen med vätgas de två första dagarna, minskar halterna av alla redoxkänsliga radionuklider inklusive molybden snabbt till sub-ppb nivåer (uran, strontium och cesium kommer från ett litet svårupplöst bränslefragment). Dessa data visar tydligt att tytor av metalliska partiklar i bränsle har en mycket stark effekt för vätgas och bidrar till dess aktivering.

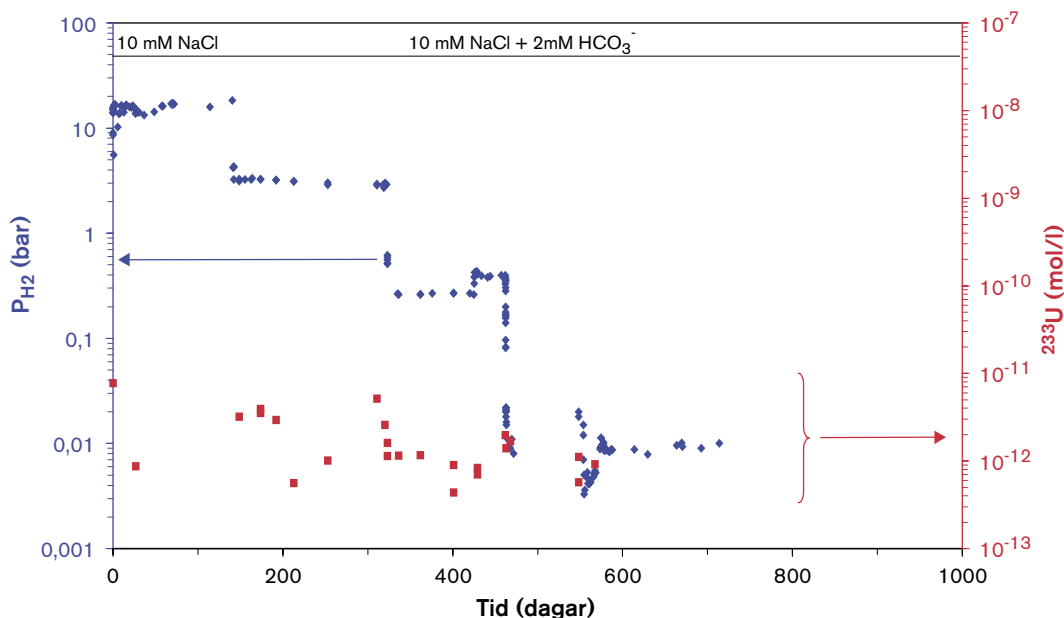


Figur 15-5. Resultat från lakning av 4-d metallpartiklar i argonatmosfär med tio procent vätgas /15-35/.

Inverkan av vätgas på upplösning av alfadopad urandioxid

Eftersom radikalrik gamma- och betastrålning har en gynnsam effekt på vätgasaktivering med åtföljande konsumtion av radiolytiska oxidanter, kan man med viss rätt ifrågasätta resultatens relevans för scenariot med använt bränsle i ett förvar. Eftersom i stort sett bara alfastrålning förväntas kvarstå under lång tid skulle den gynnsamma effekten av gamma- och betastrålningen bli allt mindre. Ett material som liknar gammalt bränsle är alfadopad urandioxid, där olika mängder av en alfastrålande isotop är homogent fördelade i urandioxidmatrisen. I samarbete med ITU, Karlsruhe, har alfadopad urandioxid syntetiserats. Som en del av SKB:s insats i EU-projektet SFS, undersöktes lakning av en urandioxidpellet dopad med tio procent uran-233 i en titanautoklav under tre olika vätgastryck. Lakningen startades med en 10 mM natriumkloridlösning under 16 bars vätgastryck. Prover på lösningen togs vid olika tidpunkter och analyserades med alfaspktrometri. Efter fyra månader var den uppskattade uranhalten i lösningen fortfarande mindre än $3 \cdot 10^{-10}$ M. För att lösa upp allt oxiderat uran från pelleten, tillsattes en bikarbonatlösning till autoklaven men inga förändringar i uranhalten noterades. Ingen mätbar upplösning av uran kunde observeras ens när vätgastrycket sänktes till 1,6 bar under en 178 dagars period. Vätgastrycket sänktes vidare med en faktor tio till 0,16 bar (1,6 bar av argon med 6,08 volymprocent vätgas) under en 141 dagars period. Preliminära resultat från alfaradiometriska analyser av uran-233 visas i figur 15-6.

Resultaten visar att under hela försöksperioden (mer än 15 månader) kunde ingen mätbar ökning av de mycket låga uranhalten i lösningen observeras. Om i det här fallet uran(VI)karbonatspecier produceras i ett några tiotals mikron tjockt skikt nära ytan (räckvidd för alfapartiklar), skulle en del av dem diffundera bort och bidra till en ökning av uranhalten i lösningen. Dessa resultat bekräftas av de uppmätta nivåerna av radiolytiskt syre, vilka ligger under detektionsgränsen (10^{-8} M) för den syresensor som var närvarande i autoklavlösningen under hela försöket. Samma sak gäller för eventuellt radiolytiskt syre eller väteperoxid; en del av detta skulle diffundera bort från ytan och orsaka en ökning av syrenivåerna, vilket till slut skulle registreras av syreelektroden eftersom försöket pågår så pass länge. Det finns nästan ingen gamma- eller betastrålning och publicerade data /15-23/ med 5 MeV heliumjoner



Figur 15-6. Uppmått vätgastryck och ^{233}U -halter i lösningen som funktion av tid.

(alfastrålning) tyder på att det inte finns någon påverkan från vätgas på oxidantförbrukningen i bulklösningen. Vid försöksavslutning ska urandioxidytan undersökas med spektroskopiska metoder för att uppskatta om oxidation har skett. Publicerade oberoende experiment med alfaradiolys i vätgasmättade lösningar och urandioxidtytor visar att ingen oxidation sker /15-29/. Titanytor ska också undersökas med hänsyn till uran. Även om titanytor inte förväntas påverka resultaten, ska försöken upprepas i autoklaver med inre kvartsytytor. Oberoende resultat från lakning av liknande urandioxidpellets i glasskärl med bara sex procent vätgas i argon visar inte heller på någon ökning av uranhaltarna med tiden /15-20/.

Inverkan av pH, salthalt och temperatur

Upplösningshastigheten för använt bränsle beror inte enbart av redoxförhållandet, även om detta är den mest betydelsefulla faktorn. Andra faktorer som inverkar är bränslets och grundvattnets sammansättning. Experiment med lakning av bränsleprover, tagna från olika segment i en bränslepinne med varierande utbränning från 21 till 49 MWd/kgU /15-36/, visar på en svag och nästan linjär ökning av utlakningen (kumulativ frigjord andel) upp till 40–43 MWd/kgU för att därefter minska. Påverkan på bildningen av sekundära faser vid bränsleupplösning undersöks separat /15-37/. Vattensammansättning i alla andra studier har valts för att undvika att det bildas sekundära faser, eftersom detta försvårar tolkningen av resultaten /15-38/.

Bränsleupplösning vid olika pH från 3 till 9,2 och olika karbonathalter från 0 till 10 mM har studerats med flödeslakning /15-39/. Försöken visar att låga pH-värden ökar upplösningen under oxiderande förhållanden. I vätgasmättade lösningar hade pH ingen inverkan. Betydelsen av mycket höga pH typiska för betonglakning har också undersökts /15-40/.

Inverkan av temperatur har studerats i intervallet 20–70 °C med hjälp av autoklaver fyllda med argon eller vätgas, och studier vid högre temperatur är planerade, se under rubriken Program nedan.

SKB har endast gjort några få egna mätningar med bränsleupplösning vid höga salthalter. Studier av upplösning av alfadopad urandioxid med isotoputspädningsmetoden vid låga och höga salthalter samt utveckling av analysmetoder är planerade i samarbete med Posiva inom ramen för EU-projektet NF-Pro.

Radiolysstudier och radiolytisk modellering

Massbalansförsök har genomförts, där tidsberoendet för bildning av väte och syre studerats i ett slutet system med cirka två gram bränslefragment och med initialt syrefria lösningar. För att kunna göra massbalansberäkningar har ett nytt lakningssystem använts som medger samtidig analys av både gasfas och lösning. Syre och väte i gasfasen mättes vid olika tidpunkter med hjälp av gasfas-elektrod-detektorer. Vattenfasen analyserades med avseende på väteperoxid (luminiscensmätning) och upplösta radionuklider (ICP-MS). Hur lösningens sammansättning påverkar radiolytisk oxidantproduktion och bränsleupplösning har studerats och modellerats /15-41/. Karbonat- och kloridhalter i lösningen varierades mellan 0 och 10 mM.

Eftersom analys av gasfasen under försökets gång alltid innebär en risk för läckage och förlust av radiolysgaser, speciellt när deras halt med tiden blir stor, har långtidförsök med igensmälta glasampuller genomförts. I försöksserien varierades bränslefragmentets storlek (yta/volymförhållanden) och lösningens sammansättning (klorid- och karbonathalter). Ampullerna öppnades och gasfasen samt lösningen analyserades efter ett, två och tre år. De uppmätta halterna av radiolytiskt syre och väteperoxid som inte reagerat med bränsleytan samt halterna av upplöst uran användes för att göra en massbalans av radiolytiska oxidanter /15-21/.

Oxidation av urandioxid med väteperoxid har studerats vid KTH. Mekanismen för reaktionen och reaktionshastigheten har bestämts /15-42/. En jämförelse av reaktionshastigheten med data för andra oxidanter, inklusive oxiderande radikaler bestämda i en separat studie /15-43/, visade att logaritmen för reaktionshastigheten är linjärt beroende av reduktionspotentialen.

Detta har stor betydelse eftersom det visar att termodynamiska data kan användas för att uppskatta kinetiska data för oxidation av urandioxid med oxiderande radikaler, något som ofta saknas. Kinetiska data från dessa arbeten tillsammans med litteratordata användes till förbättrad radiolytisk modellering av bränsleupplösningssdata från massbalansstudier /15-27/. Radiolytisk modellering har även genomförts inom EU-projektet SFS. Arbetet utfördes av Studsvik med stöd av SKB /15-44, 15-45/.

Program

Under den kommande perioden planeras insatser både för att ta fram data angående bränsleupplösning under djupförvarsliknande förhållanden och för att belysa mekanismerna för de olika processerna som bidrar till bränsleupplösning. SKB deltar i EU-projekt NF-Pro, och en del av studierna kommer att bedrivas där.

För att få fram bränsledata för de första faserna i ett scenario med skadad kapsel, när temperaturen fortfarande är hög, ska bränsle i närvaro av vattenånga och vätgas studeras. Detta kommer att utföras inom ramen för EU-projektet NF-Pro, i samarbete med ITU.

En ny autoklav med mjukmetallpackningar och andra förbättringar för att undvika luftkontamination har inköpts och ska användas för att studera bränslelakning i olika atmosfärer av argon och vätgas. En parameterstudie av temperatur och vätgasstryck i lakningen ska genomföras för att bestämma den lägsta vätgashalten som krävs för att undvika bränsleoxidation.

Försök med bränslekutsar ska utföras i Studsviks heta celler i argonatmosfär och med närvaro av siderit (järn(II)karbonat) för att undersöka vilken effekt upplöst tvåvärt järn har på bränslelakningen. Försöken med bränslekutsar i en atmosfär av argon med väte och koldioxid (tio procent vätgas och 0,03 procent koldioxid) ska avslutas och avrapporteras.

Det finns en del Mox-bränsle i Clab som också måste tas om hand, och studier av den här typen av bränsle planeras. I väntan på att få tillstånd att göra experimenten i Studsvik, har en studie av Mox-bränslelakning under vätgasatmosfär startats i Tyskland i samarbete med ITU.

Det finns många diskussioner om beteendet av den så kallade rimzonen i högutbränt bränsle. Alfaaktiviteten är mycket högre där och det finns många små fissionsgasbubblor (blomkålsstruktur) vilket komplicerar bilden. Vi planerar därför en studie där man kan separera rimzonen från en högutbränd bränslepellet och undersöka hur den lakas under vätgasatmosfär. Arbetet ska utföras i samarbete med ITU.

Lakning av syntetiska icke-radioaktiva metalliska partiklar i argonatmosfär med vätgas (tio procent vätgas) ska genomföras. Resultatet ska jämföras med vad man får med radioaktiva partiklar under samma betingelser. På så vis hoppas man kunna dra slutsatser om betydelsen av olika bidrag till vätgasaktiveringen.

En mekanistisk studie av vätgaseffekten ska genomföras inom ramen för EU-projektet NF-Pro. För att uppskatta och kvantifiera bidraget av bränslets ytor och alfastrålning måste dessa faktorer studeras separat. Försök med antingen utarmad urandioxid, icke använt bränsle eller Simfuel i vattenlösningar med olika halter upplöst vätgas eller argon ska genomföras för att studera effekten av ytor. Produktionen av oxidanter ska studeras som funktion av tiden i lösningar med olika halter upplöst plutonium-238, som är en stark alfastrålarare, och med olika halter av upplöst argon eller vätgas. Experimenten kommer att utföras vid Chalmers Tekniska Högskola.

Påverkan av väteperoxid på urandioxidtytor ska undersökas i argon- och vätgasatmosfär. Experimenten kommer att utföras vid KTH. Resultaten ska användas för att uppskatta den katalytiska effekten av urandioxidtytor på förbrukning av radiolytisk väteperoxid med upplöst vätgas.

I samarbete med Posiva ska upplösning av alfadopad urandioxid studeras i lösningar med olika jonstyrkor och redoxförhållanden för att bestämma matrisupplösningshastigheten med hjälp av isotoputbytesmetoden. Detta ingår som en del i EU-projektet NF-Pro.

Reaktioner med vattenånga på ytan av urandioxid ska studeras med experimentell mikroskopi i kombination med kvantmekanisk och molekylärmekanisk modellering. Arbetet ska utföras vid University of Michigan, USA. Många studier de senaste åren har visat att molekyler av syre, väte och vattenånga dissocieras när de reagerar med urandioxidytan. Detta är sannolikt en del av den katalytiska mekanismen.

De planerade försöken med bränsleupplösning under förvaringsförhållanden i Chemlab-sonden i Äspölaboratoriet är fortfarande i en planeringsfas på grund av förseningar med pågående aktinidförsök. Experimenten kräver omsorgsfull radiologisk kontroll vid förberedelser, genomförande och tillhörande transporter. Den exakta tidsåtgången kan inte beräknas men målet är att kunna starta med förstudier under de närmaste åren.

15.2.13 Lösning av gapinventarium

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I säkerhetsanalysen har man hittills alltid antagit att radionuklidinventariet i gapet mellan bränsle och kapslingsrör samt i korngränserna frigörs omedelbart när det kommer i kontakt med vatten. I granskningen av Fud 2001 framhöll SKI behovet av att få fram bättre experimentellt underlag för detta som oftast beskrivs som "instant release" när bränsleupplösning modelleras i säkerhetsanalysen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Lakning av metalliska partiklar extraherade från använt bränsle genom selektiv ickeoxiderande upplösning av bränslematrisen i argonatmosfär gav liknande lakningshastigheter för teknetium och molybden. Dessa var i sin tur tre storleksordningar högre än lakningshastigheterna för rutenium, rodium och palladium. Resultat från lakning i argonatmosfär med vätgas (tio procent vätgas) behandlas i avsnitt 15.2.12.

Program

Planerade insatser för att med lakförsök bestämma fraktion av lättlösliga radionuklider som frigörs i gapet mellan bränsle och kapsling redovisas i avsnitt 15.1.8.

15.2.14 Speciering av radionuklider, kolloidbildning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att osäkerhets- och känslighetsanalys av lösligheter baserade på termodynamiska beräkningar måste redovisas och att kvalitetsfrågor relaterade till databashantering måste beaktas. Kasam anser att SKB bör ägna större omsorg både teoretiskt och praktiskt åt plutoniumkemin.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Löslighetsberäkningar visar att plutonium i vissa grundvatten kan existera som trevärt plutonium. En nykommen litteraturstudie av lösligheten för plutonumdioxid /15-46/ i närvaro av tvåvärt järn visar att trevärt plutonium är den dominerande lösliga specien. Studier har genomförts för att identifiera löslighetsbegränsade faser av trevärt plutonium och bestämma deras löslighet (Chalmers Tekniska Högskola). Experimentella metoder för att preparera och analysera plutonium i olika oxidationstillstånd utvecklades under perioden. En studie av $\text{Pu}(\text{OH})_3(\text{s})$ -löslighet under 50 bar vätgastryck /15-47/ visade att plutoniumhalterna i lösning efter ett år var mellan 10^{-8} M vid pH 10 och 10^{-5} M vid pH 3. Alla försök att preparera $\text{PuOHCO}_3(\text{s})$, som man förväntar sig ska bildas under djupförvaringsförhållanden, resulterade i röntgenamorfa faser. Resultat från mätningar av löslighet av fasta faser av plutonium(III)karbonat har nyligen publicerats /15-48/.

I scenariot med en skadad kapsel har redoxförhållandena i närområdet en mycket stor betydelse. Till exempel aktiniderna som finns i bränslet har en betydligt lägre löslighet i tetravalenta tillstånd, jämfört med om de är penta- eller hexavalenta. Radiolys kan påverka redoxförhållandena och vid ytan på bränslet är strålningen intensiv. Detta kan leda till att uranoxiden i bränslet oxideras till högre valens och går i lösning som uranyljoner. Även aktiniderna neptunium och plutonium samt redoxkänsliga fissionsprodukter som teknetium och selen kan påverkas på liknande sätt och oxideras till högre valenstillstånd, med ökad löslighet och rörlighet som följd. Kolloider kan också bildas i en skadad kapsel, speciellt i samband med att radionuklider som frigörs från bränslet reduceras till lägre och mindre lösliga valenstillstånd, eller om upplöst tvåvärt järn oxideras och faller ut. Ett forskningsprogram för att studera de redoxprocesser som förväntas ske i en skadad kapsel, speciellt deras kinetik, pågår sedan några år på SKB. Påverkan av urandioxidtytor på halterna oxiderade radionuklider har undersökts under anoxiska förhållanden. Andra viktiga komponenter i närområdet är gjutjärn och dess korrosionsprodukter, samt upplöst tvåvärt järn.

I EU-projektet In Can Processes (InCan) studerade man två närbesläktade områden /15-49, 15-50/:

1. Reduktion av sexvärt uran och femvärt neptunium i närvaro av korroderande järn (miljön inne i en avfallskapsel).
2. Teoretiska *ab-initio*-beräkningar av möjligheten att reducera U(VI)-lösning med tvåvärt järn.

Reduktion av sexvärt uran och femvärt neptunium i lösningar som innehåller korroderande järn visade snabba minskningar av halterna i lösning. Undersökning av järnytorna med Rixs (Resonant inelastic X-ray scattering) visade att fyrvärt uran och fyrvärt neptunium hade fällts ut på järnytan. Elektrokemiska studier av reduktion av sexvärt uran i lösning med efterföljande bestämning av valenstillståndet visade att efter en dag hade hälften av uranet reducerats till fyrvärt i utspädda bikarbonatlösningar med E_h -400 mV på grund av aktivt korroderande järn i systemet som gav förhöjda halter av järn(II)joner i lösning. Tester i 0,1 M natriumkloridlösning visade också snabba minskningar av uranhalten. Från ursprungshalten 500 ppb föll halten till mindre än 10 ppb på tre dagar; i den lösningen var dock 86 procent av uranet i lösning fortfarande sexvärt.

Ab-initio-beräkningar visade att järn(II)joner i lösning kan reducera sexvärt uran till femvärt uran som i sin tur disproportioneras till fyrvärt och sexvärt uran. Dessa resultat ökar förståelsen för de elektrokemiska experimenten, som visade reduktion av uran både i lösning och på korroderande järn.

En studie av interaktionen mellan sexvärt uran och magnetit (syntetisk eller bildad på en korroderad järnyta) i närvaro av olika vätgasttryck visade en minskning av halterna uran i lösningen /15-51/. Försök med gjutjärnkuponger, där magnetit hade identifierats med röntgendiffraktion och XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy), visar på betydligt större förmåga att reducera upplöst sexvärt uran. Undersökning av magnetitytor med Xanes (X-ray absorption near edge structure) och XPS visade närvaro av fyrvärt uran på magnetitytor.

Ett forskningsprogram för att studera gjutjärnkorrosionsprodukter och deras interaktion med oxiderade radionuklidspecier under anoxiska förhållanden har startats i samarbete med Nagra. En noggrann experimentell metod har utvecklats för att åstadkomma helt syrefria förhållanden. En typisk studie av interaktionen mellan fyrvärt selen och järn startade med korrosion av järn i syrefria lösningar vid rumstemperatur. Efter några månader undersöktes korrosionsprodukterna med olika spektroskopiska metoder (XRD, SEM-EDS, TEM och Ramanspektroskopi). Efter tillsättning av fyrvärt selen följdes kinetiken för selenreduktion genom analyser av lösningen vid olika tidpunkter. Slutligen undersöktes järnytan efter försöket med spektroskopiska metoder vilket även inkluderade röntgenabsorptionspektroskopi (XAS) för att identifiera och speciera selen som fastnat på ytan. Preliminära resultat från XAS-karakteriseringen har publicerats /15-52/.

SKB deltar aktivt i OECD-NEA-projektet TDB (Thermodynamic Data Bases) där kvalitetsfrågor angående användning av termodynamiska databaser i säkerhetsanalyser diskuteras kontinuerligt/15-53 och 15-54/.

Program

Inom SR-Can görs en ny beräkning av radionuklidens löslighet. Huvudsyftet är att få en bättre bedömning av osäkerheter och känsligheter, särskilt med avseende på variationer i sammansättning i grundvattnet och bentonitens porvatten. Aktiviteter för att förbättra databaskvaliteten är planerade inom ramen av NEA-TDB-projektet. Lösighetsstudier av plutoniumdioxid från undermättad i vätgasmättade lösningar ska genomföras vid Chalmers Tekniska Högskola.

Studier av redoxkinetik för olika oxiderade former av radionuklider (bland annat sexvärt selen och sjuvärd teknetium) på färsk och korroderad järnnytor kommer att genomföras i samarbete med Nagra och inom EU-projektet NF-Pro. Geokemisk modellering av kinetiska data ska genomföras, och baserat på alla data ska slutsatser dras angående retention av radionuklider.

15.2.15 Heliumproduktion

Alfapartiklar (heliumkärnor) från alfasönderfall i bränslet bildar gasformigt helium.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 gjordes den bedömningen att området inte krävde någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration, men att fältet skulle bevakas med beredskap till nya insatser om särskilda skäl för detta framkom.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

SKB gör samma bedömning som i Fud 2001, att området inte kräver någon ytterligare forskning men att det bör bevakas ifall skäl för nya insatser framkommer.

16 Kapseln som barriär

SKB:s referenskapsel består av en inre behållare av gjutjärn och ett yttre hölje av koppar. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvaringsmiljön. Den tekniska utvecklingen av utrustningar och metoder att tillverka, försluta och prova kapseln beskrivs i kapitlen 5–7, och projekteringen av inkapslingsanläggningen behandlas i kapitel 8.

Kapseln är en viktig barriär mot spridning av radionuklider. I det här kapitlet beskrivs den forskning som SKB genomför i avsikt att pröva kapselns långsiktiga säkerhet.

16.1 Initialtillstånd för kapseln

Med initialtillstånd för kopparkapseln och gjutjärnsinsatsen menas tillståndet hos kapseln vid tiden för deponeringen. Tillståndet beskrivs i säkerhetsanalysen med hjälp av en uppsättning variabler.

16.1.1 Variabler

Inga förändringar har skett beträffande variablerna för kopparkapsel och gjutjärnsinsats. Det är samma uppsättning som redovisades i Fud 2001, se tabell 16-1.

Tabell 16-1. Variabler för kopparkapsel och gjutjärnsinsats.

| Variabel | Definition |
|------------------------|--|
| Geometri | Geometriska mått för kapselkomponenterna. Här ingår även en beskrivning av eventuella tillverkningsfel vid svetsning och dylikt. |
| Strålintensitet | Intensitet av α -, β -, γ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna. |
| Temperatur | Temperatur som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna. |
| Mekaniska spänningar | Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna. |
| Materialsammansättning | Materialsammansättning hos kapselkomponenterna. |

16.1.2 Geometri

Variabeln kapselgeometri, som används i säkerhetsanalysen omfattar utöver kapselns geometriska form även eventuella initiala defekter i förslutningen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud-program 2001 anger SKB en plan för hur acceptanskriterier ska tas fram och att erfarenheterna från provsvetsningen ska ge information om typer och frekvens för fel som kan uppstå vid svetsningen. SKI instämmer i att detta är rätt väg att gå, men vill påminna om att acceptanskriterier ska tas fram för tillåtna defekter i såväl kopparhölje och svetsar som i de gjutna insatserna. Konsekvensanalyser ska visa vad som händer om det finns fler och/eller större defekter än vad acceptanskriterierna anger. Även effekterna av mindre defekter bör analyseras för att kartlägga systemets känslighet, vilket även SSI påpekar. När det gäller kommande säkerhetsanalyser menar SKI att det ska finnas en stark koppling mellan indata till säkerhetsanalysen, uppsatta acceptanskriterier och teststatistik från den oförstörande provningen. SKB anger att arbetet kommer att bedrivas gemensamt med representanter från säkerhetsanalys, forskning och teknikutveckling, vilket SKI ser mycket positivt på.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Data och erfarenheter sedan Fud 2001 finns redovisade /16-1/.

Program

SKB:s forskningsprogram för att fastställa acceptanskriterier och i ett senare skede arbeta mot kvalificering av utrustningar för oförstörande provning fortsätter under kommande period. Utvärderingen av provsvetsningar vid Kapsellaboratoriet pågår och information insamlas om de typer av fel och även frekvensen av fel som elektronstrålesvetsning och friction stir welding kan ge upphov till, se även kapitel 6.

16.1.3 Strålintensitet

SKB:s kriterium är att ytdosraten på kapseln inte får överstiga 1 Gy/h.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inga direkta synpunkter fördes fram.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.1.4 Temperatur

Här avses kapselns initiala temperatur, det vill säga temperaturen omedelbart efter deponering. Denna variabel ingår formellt i initialtillståndet, men föranleder inga forskningsinsatser. Kapselns temperaturutveckling uppskattas i en integrerad temperaturmodellering av förvarets närområde, se vidare avsnitt 15.1.4.

16.1.5 Mekaniska spänningar

De restspänningar som kan kvarstå i förslutningssvetsen efter en mycket lång tid är låga och bedöms inte ha någon betydelse för kapselns livslängd.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inget forskningsprogram presenterades i Fud 2001.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Som framhölls i Fud 2001 bedöms området inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration för kapslar förslutna med elektronstrålesvets. Storleken på och betydelsen av eventuella restspänningar i förslutningssvetsar utförda med friction stir welding bör utredas under perioden.

16.1.6 Materialsammansättning

Valet av material för insats och kopparhölje baseras på konstruktionsförutsättningarna.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inget forskningsprogram presenterades i Fud 2001. Programmet för kapselutformning redovisas i kapitel 5.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.2 Kapselprocesser

16.2.1 Översikt av processer

Genom stråldämpning i kapselmaterialen omvandlas en del av strålningen som tränger ut till kapseln till värmeenergi. Värmetransport sker genom ledning inom insats och kapsel samt till stor del genom strålning mellan dessa två delar.

Insats och kapsel kan deformeras mekaniskt av yttre laster. Dessutom förekommer termisk expansion som bland annat leder till att hålrummet mellan insats och kapsel förändras.

En viktig kemisk process är utvändigt kopparkorrosion, men även spänningsskorrosion skulle kunna förekomma i såväl kopparkapsel som gjutjärnsinsats. Materialen kan förändras av strålpåverkan. Om vatten tränger in sker korrosion av gjutjärnsinsatsen med åtföljande vätegasbildning och galvanisk korrosion.

Radionuklidtransport i kapselns hålrum behandlas i avsnitt 15.2.8.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i kapseln.

16.2.2 Stråldämpning/värmealstring

De fysikaliska förlopp som här avses (radioaktivt sönderfall och absorption av strålning) är väl kända och tillgången på data är tillräcklig för säkerhetsanalysen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inget forskningsprogram presenterades i Fud 2001.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Som framhölls i Fud 2001 bedöms området inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

16.2.3 Värmetransport

Ingen ny kunskap har framkommit. Processen behandlas som i Fud 2001 det vill säga i samband med bränslets temperaturutveckling, se avsnitt 15.1.4.

16.2.4 Deformation gjutjärnsinsats

Deformation av gjutjärnsinsatsen skulle teoretiskt kunna ske vid stora tektoniska rörelser.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI framhåller att det är angeläget att SKB gör nya beräkningar av den mekaniska hållfastheten för kapseln, där alla komponenter ses över såsom:

- Verkligt erhållna materialdata från tillverkade insatser.
- Uppdaterade materialdata för bentonit.
- Laster under glaciation (konsistent med scenariovalet).
- Definierade tillåtna defekter (från konsekvensanalysen).
- Brottkriterier vid skjuvrörelser.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Med uppdaterade materialdata för bentonit har kapseln med insats kontrollberäknats för skjuvrörelser, som eventuellt kan uppkomma vid jordskalv /16-2/. Bergskjuvningen har modellerats och beräknats med finita-element-koden Abaqus. Ett tredimensionellt elementnät som modellerar bufferten och kapseln har skapats och ett antal beräkningar som simulerar olika bergskjuvningar har utförts.

Bergskjuvningen antas ske vinkelrätt mot kapselns axel antingen i centrum av deponeringshålet eller i fjärdedelspunkten. Skjuvberäkningen har drivits till en total skjuvning av 20 centimeter. Bufferten har modellerats vid fyra densiteter mellan 1 950 och 2 100 kg/m³, vid vattenmättnad och vid skjuvhastigheter mellan 0,0001 och 1 000 millimeter per sekund.

Resultaten visar att inverkan av särskilt buffertens densitet och skjuvplanets läge är stor, men också att skjuvhastigheten och storleken hos skjuvrörelsen har en signifikant påverkan. Vid de två lägre densiteterna är ett excentriskt skjuvplan farligare, men vid de två högre densiteterna är en centrisk skjuvning värst. Vid den konservativa kombinationen av skjuvhastigheten 1 millimeter per sekund, skjuvrörelsen 20 centimeter och densiteten 2 100 kg/m³ blir järnkapseln starkt påverkad med plastiska töjningar upp till 19 procent men vid referensfallet med buffertdensiteten 2 000 kg/m³ och skjuvrörelsen 10 centimeter reduceras den plastiska töjningen till 1,6 procent.

Program

Under 2003 startades ett stort program för probabilistisk analys av kapselhållfasthet. Inom detta program tar vi fram materialdata från tillverkade kapslar. Tryckprovning av kapselsektioner ingår också i programmet. Enligt planerna ska detta program avslutas under 2004.

16.2.5 Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI uppmanar SKB att visa hur en förenkling av modellen för deformation av kopparkapseln inverkar på resultatet. Förenklingen innebär att man antar plastisk kollaps i stället för kryp.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Under perioden har SKB fortsatt krypprovningen av elektronstrålesvetsar och svetsar gjorda med friction stir welding /16-3/.

Program

Programmet för krypprovning kommer att fortsätta under den kommande treårsperioden. Modelleringar av krypdeformation av kopparkapseln under långsam pålastning övervägs.

16.2.6 Termisk expansion

Skillnaden i längdutvidgningskoefficient mellan gjutjärn och koppar kan leda till töjningar i kopparkapseln. Dessa är dock försumbara från hållfasthetssynpunkt.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Behandlas inte i Fud 2001.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.2.7 Deformation från inre korrosionsprodukter

Uppbyggnaden av korrosionsprodukter mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet kan leda till ett inre tryck på kopparhöljet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI ser SKB:s fortsatta program att karakterisera korrosionsprodukter som rimligt, men upprepar uppmaningen till SKB att fortsätta arbetet med att ta fram ett detaljerat underlag för att kunna uppskatta korrosionen av gjutjärnet, om ett hål i koppars insats uppstår. I detta arbete bör hänsyn tas till den lokala miljön i den smala spalten mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet med tänkbara effekter av till exempel karbonat och sulfid på sammansättningen hos korrosionsprodukterna, och möjligheten till aerob korrosion på grund av radiolys av vatten. Eventuella effekter på korrosionshastigheten på grund av metallisk koppling mellan koppar och gjutjärn (galvanisk korrosion), liksom transportegenskaper inuti och omkring en skadad kapsel, bör också ingå.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Konsekvenserna av uppbyggnaden av korrosionsprodukter i spalten mellan kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen har sedan SR 97 undersökts experimentellt /16-4, 16-5/. I inget av experimenten lyckades man påvisa någon tryckuppbyggnad som följd av uppbyggnaden av korrosionsprodukter. Försök att få uppfattning om de långsiktiga konsekvenserna av uppbyggnaden av korrosionsprodukter har också gjorts genom studier av arkeologiska analogier /16-6/. Även här var slutsatserna att inga tecken på kraftigare deformationer kunde konstateras på kopparbaserade material i nära kontakt med anaerobt korroderande järn.

Program

De pågående experimenten kommer att avslutas under perioden. Studiet av analogier kommer att fortsätta under perioden under förutsättning att det finns bra studieobjekt.

16.2.8 Korrosion gjutjärnsinsats

Om det finns en genomgående skada i kopparhöljet kan vatten nå in till gapet mellan kapselinsats och kopparhölje och vidare in i insatsen för att där leda till anaerob korrosion.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 16.2.7.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Resultaten från de senaste tio årens forskning har sammanfattats i två artiklar publicerade i tidskriften Corrosion /16-7, 16-8/. Korrosionshastigheter uppmätta utifrån mängden producerad vätgas visar på initialt höga värden på 10–30 mikrometer per år, men efter att en oxidfilm bildats sjunker hastigheten till mindre än 0,1 mikrometer per år. Korrosionshastigheten visade sig vara oberoende av om materialet var helt, delvis eller inte alls nedsänkt i vattnet. Andra slutsatser som drogs från experimenten var att vätgasövertryck på upp till 100 bar inte hade någon påverkan på korrosionshastigheten. Ingen lokal korrosion initierades under anaeroba förhållanden.

En undersökning av korrosion av järn i kontakt med bentonit pågår. De första resultaten visar en något högre korrosionshastighet än vad som uppmätts utan närvaro av bentonit /16-9/. Det är ännu inte klarlagt om denna ökning beror på växelverkan med mineralen i bentoniten eller om den orsakas av att bentonitporvattnet har en annan sammansättning än de vattentyper som användes vid de tidigare experimenten, där vattensammansättningen visade sig ha viss betydelse för korrosionshastigheten.

Program

Eftersom vattensammansättningen i experimenten visade sig ha viss betydelse för korrosionshastigheten kommer ytterligare experiment med andra vattentyper att genomföras under perioden. Undersökningen av korrosion av järn i kontakt med bentonit kommer att fortsätta under perioden.

Under föregående period startades undersökningar av anaerob korrosion av järn i gammastrålfält. Undersökningen pågår fortfarande och kommer att avslutas under 2005.

16.2.9 Galvanisk korrosion

Metallisk kontakt mellan gjutjärn och koppar ger förutsättningar för galvanisk korrosion.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 16.2.7.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Under 2001 startades ett projekt för att bestämma eventuella effekter på korrosionshastigheten på grund av metallisk koppling mellan koppar och gjutjärn. Projektet kommer att slutrapporteras under 2004 /16-10/. De resultat som kommit fram hittills visar att även om man under syresatta

förhållanden kunde mäta korrosionshastigheter på upp till 100 mikrometer per år var den minst en faktor 100 lägre under syrefattiga förhållanden. Experimenten utfördes i en handsbox i en atmosfär med 1–2 ppm syre. Typiska korrosionshastigheter var mindre än 0,1 mikrometer per år vid 30 °C och mindre än 1 mikrometer per år vid 50 °C.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.2.10 Spänningskorrosion gjutjärnsinsats

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Behandlas inte i Fud 2001. SKB bedömer riskerna för spänningskorrosion som små eftersom endast lokala områden i insatsen har dragspänningar.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.2.11 Strålpåverkan

En utredning av riskerna för strålningsförspridning utfördes inför Fud 2001. Utredningen visar att riskerna är försumbara och att påverkan under 100 000 år inte ens skulle vara mätbar /16-11/.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Behandlas inte i Fud 2001.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

16.2.12 Korrosion kopparkapsel

Under nu kända förhållanden på försvarsdjup beräknas kapseln förbli intakt under mycket lång tid.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att det finns frågeställningar som behöver belysas ytterligare, framför allt egenskaperna hos kopparoxidfilmer och särskilt inverkan av klorid- och sulfidjoner, och inverkan av betong på koppar (salta alkaliska vatten).

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

En litteraturoversikt över kopparkorrosion i alkaliska vatten med olika salthalter har publicerats /16-12/. Slutsatserna i rapporten var att en ökning av pH kommer att passivera kopparytan. Stabiliteten på passivfilmen och dess förmåga att förhindra lokal korrosion ökar med ökande pH. En ökning av pH upp till 12–13 kommer därför att ha liten inverkan på kapselns integritet.

Sedan Fud 2001 har en experimentell undersökning av korngränskorrosion i elektronstråle-svetsar och svetsar gjorda med friction stir welding påbörjats vid Korrosionsinstitutet AB. Preliminära resultat tyder på att elektronstrålesvetsarna inte är känsliga för korngränskorrosion. Detta är i överensstämmelse med resultaten från tidigare undersökningar /16-13/. Arbetet kommer att fortsätta under det närmaste året.

En experimentell studie av kopparkorrosion under syrefria förhållanden i kloridhaltiga vatten (1 molar NaCl) har genomförts sedan Fud 2001 i samarbete med Posiva /16-14, 16-15/. Resultaten visar att efter en initial period på några timmar med stor korrosionshastighet avtar korrosionshastigheten och är efter cirka 30 dagar praktiskt taget noll.

Ett projekt att med hjälp av elektrokemiska metoder och ytanalysmetoder studera mekanismerna för sulfidpåverkan på koppar har startats vid University of Western Ontario. Huvudmålet med detta projekt är att utveckla en modell för att förutsäga långtidsbeteendet för kopparkapslar i djupförvarsmiljö. Projektet kommer att löpa under hela den kommande treårsperioden.

Sedan flera år tillbaka pågår ett program för att kartlägga förutsättningarna för bakteriell korrosion av koppar. Tidigare resultat har visat att sulfatreducerande bakterier inte kan vara aktiva i kompakterad bentonit. Inget nytt som motsäger detta har framkommit under perioden /16-16/. Arbetet kommer att fortsätta in i kommande period.

Fältexperiment i Äspölaboratoriet med exponering av koppar under flera år – dels för atmosfären i underjordslaboratoriet och dels för olika grundvatten – har pågått under den gångna treårsperioden. Experimenten med exponeringarna i grundvatten löper vidare in i nästa treårsperiod. De luftexponerade proverna har utvärderats och resultaten visar att korrosionsangreppen varit mindre än vad man normalt får i normal stadsatmosfär /16-17/.

Program

Utöver vad som nämnts ovan för redan pågående projekt, som löper vidare under den kommande perioden, ska ett projekt som syftar till att belysa egenskaperna hos kopparoxidfilmer och särskilt inverkan av klorid- och sulfidjoner startas vid fysiska institutionen vid Uppsala universitet. Projektet kommer att använda ytkänsliga spektrometriska metoder för att karakterisera sorberade och kemiskt bundna sulfid- och kloridspecies till rena kopparytor och kopparytor med olika ytfilmer.

16.2.13 Spänningskorrosion kopparkapsel

Dragspänningar i kopparkapseln är en nödvändig förutsättning för spänningskorrosion. Eftersom kapseln är utsatt för ett yttre tryck är det inte troligt att spänningskorrosion skulle kunna leda till genombrott på kapseln.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI menar att SKB måste visa att kapseln inte befinner sig i en miljö som kan orsaka spänningskorrosion på kopparn (eller ta hänsyn till spänningskorrosion i analysen av kapselns livslängd).

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit. Pilotförsöken som genomfördes, av förutsättningarna för att studera spänningskorrosion med mätningar av elektrokemiskt brus, gav negativt resultat. Tekniken visade sig inte vara tillämpbar på spänningskorrosionsmätningar.

Program

En studie av spänningskorrosion i acetathaltiga vatten kommer att genomföras under nästa treårsperiod i samarbete med Posiva. Utöver detta pågår en ny pilotstudie; denna gång av förutsättningarna för att studera spänningskorrosion med mätningar av akustisk emission från spricktillväxt.

16.2.14 Korntillväxt koppar

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Området bedömdes inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration, utan det skulle räcka att bevaka fältet med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkom.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

SKB gör samma bedömning som i Fud 2001, att det räcker med att bevaka området.

16.2.15 Radionuklidtransport

Radionuklidtransport i närområdet behandlas i avsnitt 18.3.

16.2.16 Integrerade studier – skadad kapsels utveckling

Om vatten tränger in i en skadad kapsel leder detta till vätgasutveckling som ökar trycket inne i kapseln, vilket i sin tur minskar hastigheten varmed vattnet rinner in. Vid någon tidpunkt då tryckskillnaden är liten kommer indiffusion av vattenånga att vara större än inläckaget av flytande vatten. Tiden fram till dess varierar med antagandet om hålets storlek och korrosionshastigheten, men är i de flesta fall tusentals år. Indiffusionen av vattenånga innebär att korrosionen inte kommer att avstanna helt. Detta kommer att leda till en långsam ansamling av korrosionsprodukter och en tryckuppbyggnad innanför kopparkapseln, som till slut skulle kunna skada kopparhöljet. För att få en bild av hur en skadad kapsel utvecklas måste olika processer modelleras integrerat.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att SKB:s tidigare redovisade modell för skadad kapsel visar att även en defekt kapsel har en betydande barriärfunktion. Däremot är myndigheten skeptisk till att den kvantitativa information som fås fram ur modelleringen av skadad kapsel tolkas alltför bokstavligt och integreras direkt i en konsekvensanalys.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Se avsnitt 16.2.7.

Program

Korttidspörsök för att förstå utvecklingen under tidsskalor på hundratusentals år är av begränsat värde, men kan ändå bidra till en bättre förståelse för utvecklingen av en skadad kapsel i djupförvaret. SKB kommer under den kommande treårsperioden att starta ett antal modellförsök där miniatyrkapslar, kompletta med insats men med defekta kopparhöljen, deponeras i borrhål genom vattenförande sprickor i Äspölaboratoriet. Försöken planeras pågå under fem till tio år och förhoppningen är att de ska bidra till att förstå hur korrosionsangreppen i spalten mellan kopparhölje och gjutjärnsinsats kan komma att utvecklas.

17 Buffert

Buffertens huvuduppgift är att hindra strömmande vatten från berget att komma i kontakt med kapseln och det använda bränslet. För att klara denna uppgift måste följande krav vara uppfyllda:

- Den hydrauliska konduktiviteten måste vara så låg att en eventuell transport av korroderanter och radionuklider enbart sker genom diffusion.
- Bufferten måste bibehålla sina dimensioner.
- Bufferten måste ha förmåga att självläka, det vill säga inga bestående sprickor får bildas.
- Buffertens egenskaper måste vara fysikaliskt och kemiskt stabila i ett långt tidsperspektiv.

Det är också önskvärt att bufferten förhindrar mikrobiell verksamhet på och i närheten av kapsels yta.

Bufferten får inte heller ha några egenskaper som kan inverka negativt på de andra barriärerna. För att uppfylla detta ska följande gälla:

- Gasgenomsläppligheten ska vara tillräcklig för att stora mängder gas, som eventuellt bildas i en skadad kapsel, ska kunna passera. Gasgenomgången får inte leda till kvarstående genomsläppliga kanaler eller hålrum i bufferten.
- Svälltrycket ska vara tillräckligt högt för att ge god kontakt med omgivande berg och med kapseln, men inte högre än vad kapseln och omgivande berg kan utstå.
- Deformerbarheten ska inte vara större än att kapslarnas läge bibehålls, men heller inte mindre än att bergörelser kan tas upp utan att kapslarna skadas.
- Värmeledningsegenskaperna ska vara sådana att värmen från kapslarna inte leder till oacceptabla fysikaliska och kemiska förändringar av bufferten.
- Bufferten ska inte innehålla något som påverkar de andra barriärernas funktion negativt.

Bufferten bör också ha en förmåga att filtrera ut kolloidala partiklar.

SKB har tidigare valt en naturlig natriumbentonit av Wyoming-typ som referensmaterial för bufferten. MX-80 är en produktbeteckning på en blandning av olika horisonter av naturlig lera från Wyoming eller South Dakota i USA. Beteckningen MX-80 specificerar en viss kvalitet och kornstorlek av den torkade och malda bentoniten. De senaste årens studier av alternativa buffertmaterial har dock visat att det finns ett flertal natrium- och kalciumbentoniter på marknaden som mycket väl kan fylla SKB:s krav, se vidare avsnitt 17.1.2.

Baserat på genomförda undersökningar har SKB dragit slutsatsen att en buffert bestående av MX-80 efter vattenmättnad bör ha en densitet av 1 900–2 100 kg/m³.

Det valda materialet har följande egenskaper som relaterar till kraven ovan:

Hydraulisk konduktivitet och jondiffusion

Buffertens huvuduppgift är att garantera att diffusion är den dominerande transportmekanismen runt kapslarna. Med en bentonitbuffert med en densitet på 2 000 kg/m³ i vattenmättat tillstånd är transportkapaciteten för advektion minst 10 000 gånger lägre än den för diffusion.

Bentonit begränsar utsläppet av radionuklider från en defekt kapsel. Effekten är dock beroende av den individuella nuklidens egenskaper (diffusivitet, sorptionskoefficient och halveringstid) samt närområdets geometri (defekten i kapseln, transportvägar in i berget).

Svällgenskaper

Bufferten måste kunna svälla för att fylla utrymmet mellan kapsel och berg och för att täta öppningar som kan orsakas av termiska och tektoniska effekter. Erforderlig expansionsförmåga hos bufferten uppskattas motsvara ett minsta svälltryck på cirka 1 MPa, vilket förutsätter en densitet av minst 1 900 kg/m³ för MX-80 i vattenmättat tillstånd.

Långtidsstabilitet

Kommersiella bentoniter är naturliga material som ofta har bildats för tiotals miljoner år sedan. Detta innebär inte automatiskt att bentonit är stabil i försvarsmiljö. De undersökningar av bentonits långtidsegenskaper som gjorts inom och utom SKB:s program visar dock att kompakterad bentonit kan bibehålla sina gynnsamma egenskaper under långa tider och under en rad av olika kemiska och termiska förhållanden.

Mikrobiella egenskaper

Bakterietillväxt har visat sig kunna ske i MX-80 buffert med en densitet av upp till 1 700 kg/m³ vid vattenmättnad, medan 1 900 kg/m³ inte medger någon möjlighet till överlevnad eller reproduktion av bakterier av det slag som undersökts i SKB:s forskning. Det innebär att den sistnämnda densiteten kan ses som den lägsta lämpliga.

Gaskonduktivitet

De försök som har genomförts i SKB:s regi indikerar att MX-80 bentonit kan öppna sig och släppa ut stora mängder vätgas, vilket kan bildas vid korrosion av järninsatsen i en defekt kapsel. Därmed kan oacceptabla tryck i kapseln och mot bufferten undvikas i en sådan situation.

Deformationsegenskaper

De viktigaste deformationerna hos bufferten är expansionen uppåt genom förskjutning av tunnelåterfyllningen och skjuvning till följd av förskjutningar i berget. Den uppåtriktade expansionen kan lyfta tunnelgolvet med sprickvidgning och kraftigt ökad hydraulisk konduktivitet som följd.

Förskjutningar i berget kan ske i form av tektoniskt eller termiskt betingad skjuvning av sprickor som skär deponeringshålen. Praktiska försök med MX-80-lera med en densitet på upp till cirka 2 050 kg/m³ och tillämpning av en halvempirisk reologisk modell har visat att förutsedda bergrörelser inte åstadkommer buffertdeformationer som ger upphov till kapselskador.

Termiska egenskaper

Buffertens förmåga att överföra värme från kapslar till berg har betydelse främst genom att ett alltför lågt värmeledningstal ger upphov till hög bufferttemperatur. Det medför ändrade lösligheter hos buffertmineralen och ett ångtryck som kan leda till att vattenånga tränger ut från bufferten genom överliggande tunnelåterfyllning. För att minimera negativa effekter av för hög temperatur och för hög temperaturgradient har högsta kapseltemperatur satts till 100 °C.

Tillverkning av buffertblock beskrivs i avsnitt 10.2.2. I det följande tas tillverkningsfrågor upp endast i den mån de har betydelse för redovisningen av forskningsprogrammet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I granskningen av Fud 2001 påpekar SKI att: bufferten är väsentlig för förvaret, framför allt som skydd för kapseln, att SKB:s program för bufferten syns vara heltäckande och vittnar om en god förståelse av samband mellan initiala och långsiktiga processer och att inget talar emot att en buffert med godtagbara egenskaper skulle kunna tas fram.

SKI påpekar dock att det är svårt att utifrån SKB:s redovisning i Fud-programmet göra bedömningar av enskilda områden var för sig på grund av kopplingar och återverkningar på andra områden.

17.1 Buffertens initialtillstånd

17.1.1 Variabler

I SR 97 beskrevs bufferten med en uppsättning variabler, se tabell 17-1.

Initialtillståndet, det vill säga värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering, beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 6.4 /17-1/. I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i bufferten.

Tabell 17-1. Variabler för bufferten och återfyllningen.

| Variabel | Definition |
|-------------------------------|--|
| Geometri | Geometriska mått för buffert/återfyllning. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären. |
| Porgeometri | Porgeometri som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. Ofta anges porositet, det vill säga den andel av volymen som inte upptas av fast material. |
| Strålintensitet | Intensitet av (α -, β -,) γ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Temperatur | Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Montmorillonithalt | Montmorillonithalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Vattenhalt | Vattenhalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Gashalter | Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Hydrovariabler | Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Svälltryck | Svälltryck som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Montmorillonit-sammansättning | Montmorillonitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till montmorillonitytan ingår i denna variabel. |
| Porvatten-sammansättning | Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning. |
| Föroreningshalter | Halter av föroreningar i tid och rum i buffert och återfyllning. Till föroreningar räknas alla mineral utom montmorillonit. I återfyllningen räknas bergkrosset till föroreningarna. |

17.1.2 Geometri

Buffertens geometri bestäms av dimensionerna på kapseln och den tjocklek av buffertmaterialet som krävs för att få önskad funktion. I SR 97 och Fud 2001 var kapselns mått givna och dimensionerna valdes till 35 cm på kapselns sidor, 50 cm under kapseln och 150 cm ovanför kapseln. Dessa mått gäller fortfarande för KBS-3V medan det är små skillnader för KBS-3H.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI påpekar att SKB måste hinna göra valet av optimal buffert (egenskaper och tillgänglighet) innan ansökan lämnas in. Kasam ser positivt på SKB:s planer att genomföra studier av alternativa buffertmaterial för att få en alternativ referens till bentonit med hög halt av montmorillonit.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ett grundläggande krav hos bufferten är att den har svällande och därigenom tätande egenskaper. Montmorillonit med natrium som motjon har mycket stor svällpotential och finns i tillräckliga brytbara mängder för att vara ett realistiskt buffertalternativ. SKB har därför under lång tid använt en sådan bentonitkvalitet från American Colloid Co (Wyoming) med produktnamn

MX-80 som referensmaterial. Ett omfattande program för att studera alternativa buffertmaterial har påbörjats och till stor del genomförts. Huvudsyftet är att korrelera fysikaliska och kemiska egenskaper till grundläggande mineralogiska egenskaper. Projektet innefattar:

- Produkter med liknande halt av montmorillonit och motjonsfördelning som i MX-80, eftersom dessa material kan antas ha likvärdiga tätningsegenskaper.
- Material med hög halt av montmorillonit och som domineras av tvåvärda joner. Buffertens höga densitet innebär teoretiskt att sådana material har tillräcklig svällbarhet. Tvåvärda motjoner (till exempel kalcium) förväntas dessutom ge fördelar vid bland annat låg jonstyrka i grundvattnet.
- Material som innehåller andra svällande mineral.
- Material som innehåller lägre halt av svällande mineral, huvudsakligen för eventuell användning som tunnelåterfyllnad.

Ett flertal kommersiella bentoniter från stora producenter har undersökts med avseende på detaljerad mineralogi och svällningsegenskaper. Undersökningarna har hittills genomförts på referensmaterialet MX-80 från Wyoming (American Colloid), fyra prov från Indien (Ashapura), samt ett prov från Grekland (Silver & Baryte). Samtliga material har en hög halt av montmorillonit och representerar olika relationer mellan envärda och tvåvärda katjoner. För närvarande studeras tre prov från Danmark (NCC) och tre prov från Tjeckien (från ett universitet i Prag). Fyra av proven är exempel på material med lägre halt av montmorillonit.

Entydiga övergripande resultat är att material med hög montmorillonithalt, likartad laddningsfördelning och natrium som motjon uppvisar försumbara skillnader i fysikaliska egenskaper, oberoende av brytplats. Kalcium som motjon innebär minskad svällningspotential, men tätningsegenskaper som är likvärdiga med natriumbentonit vid buffertförhållanden. Ur svällningshänseende är flera av de undersökta bentoniterna lämpliga som buffertmaterial utan att buffertens dimensioner behöver ändras. Andra aspekter, till exempel långtidsstabilitet och inverkan av de accessoriska mineralen, behöver emellertid undersökas ytterligare.

Program

Pågående laboratorieundersökningar kommer att fortsätta med syfte att korrelera önskvärda fysikaliska och kemiska egenskaper till grundläggande mineralogiska egenskaper, till exempel samband mellan å ena sidan svälltryck och å andra sidan lermineralets katjonbyteskapacitet, jonslag (natrium eller kalcium) och laddningsfördelning. Målet är att beskriva avgörande samband så väl att upphandling av buffertmaterial kan optimeras med avseende på säkerhet, tillgänglighet och kostnad.

Fältförsök kommer att genomföras med material som enligt laboratorieundersökningarna är tänkbara buffertmaterial. Försöken planeras ske enligt samma försöksprinciper och i samma skala som de pågående Lot-försöken i Äspölaboratoriet. Syftet är att verifiera resultaten från laboratorieundersökningarna under mer realistiska förhållanden med avseende på temperatur, skala och geokemiska förhållanden, samt att upptäcka eventuella hanteringsproblem. Resultaten från hittills genomförda undersökningar visar att material från Milos, Grekland (S&B Industrial Minerals SA) och Buj, Indien (Ashapura Minechem Ltd) är lämpliga att ingå i testserien.

17.1.3 Porgeometri

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I SR 97 antogs att bufferten hade en torrdensitet på $1\,590 \pm 30 \text{ kg/m}^3$. Detta ger porositeten 41 procent. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning. I Fud-program 2001 påpekas att andra leror än MX-80 skulle kunna klara de konduktivitetskrav som ställs på bufferten. Ett val av en annan lera skulle eventuellt leda till val av annan densitet och porositet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Buffertens mycket låga hydrauliska konduktivitet, trots att porositeten är över 40 procent, antyder att porvolymens fördelning har en avgörande betydelse för egenskaperna hos bentoniten. Olika såväl kvalitativa som kvantitativa beskrivningar av porstruktur, och hur denna påverkar egenskaper som diffusion, konduktivitet och svälltryck, finns i litteraturen. SKB avser därför att påbörja en studie med syfte att kvantifiera porstrukturer i tänkbara bentonitmaterial vid olika fysikaliska-kemiska förhållanden.

17.1.4 Strålintensitet

Dosraten på kapselytan beräknades i SR 97 till initialt 100–500 mGy/h och på utsidan av bufferten till initialt cirka 2 mGy/h. Beräkningarna bygger på samma antaganden som materialet i avsnitt 17.2.2.

17.1.5 Temperatur

Buffert och återfyllning har vid deponeringen omgivningens temperatur. Denna varierar med förvarsplatsen och deponeringsdjupet och är cirka 10–15 °C. Temperaturen beror till viss del på hanteringssekvensen, var buffertblocken har lagrats, värme från deponeringsmaskinen, etc. Det är rimligt med en osäkerhet på omkring 5 °C.

Bestämningen av den initiala bufferttemperaturen är trivial, i motsats till värmetransporten i bufferten efter deponering, se avsnitt 17.2.12.

17.1.6 Montmorillonithalt

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

De kommersiella bentoniter som är intressanta som buffertmaterial har en given sammansättning. Montmorillonithalten ligger normalt på drygt 80 procent. Den levererade produkten kommer att kvalitetstestas innan den tas till förvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Nya metoder för att bestämma mineralfördelningen i buffertmaterial har använts och utvecklats. Bland annat har den viktiga materialparametern katjonbyteskapacitet (CEC) bestämts med en enklare och säkrare metod /17-2/. Vidare har en ny analysmetod (Rietveldteknik) för kvantifiering av mineral från röntgendiffraktogram utnyttjats. Detaljerade bestämningar av mineralogin hos MX-80-material har genomförts inom Lot-projektet, för referensmaterial och för exponerat material. Andra bentonitmaterial har studerats i projektet alternativa buffertmaterial, se avsnitt 17.1.2. Nya bestämningar av montmorillonithalten i MX-80 har gjorts för ett tiotal leveranser, vilka representerar 20 års produktion. Halten montmorillonit ligger enligt dessa kring 85 procent med några procents variation. Tidigare bestämningar har angivit cirka 75 procent /17-3/, medan tillverkaren av MX-80 har angivit att montmorillonithalten är över 90 procent. Den undersökta bentoniten från Milos har en montmorillonithalt av 80 till 85 procent.

Program

SKB avser att fortsätta utveckling av test- och analysmetoder, samt att genomföra undersökningar av svällbara mineral i tänkbara buffertmaterial i enlighet med avsnitt 17.1.2.

17.1.7 Vattenhalt

I KBS-3V i SR-Can antas de kompakterade bentonitblocken ha en initial vattenmättnadsgrad av mellan 70 och 85 procent. Vidare antas att spalterna mellan blocken och berget kan reduceras till tre centimeter. Spalterna mellan bufferten och kapseln samt mellan bufferten och berget kan eventuellt fyllas med vatten, men i SR-Can antas att de är torra. I KBS-3H kan halten vara något lägre.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inte behandlat.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Inget arbete med isostatisk blocktryckning har utförts sedan Fud 2001. Fullstora block med hög vattenmättnadsgrad har tryckts med enaxlig teknik för Lasgit i Äspö HRL. Ringar med 99 procent vattenmättnadsgrad och cylinderblock med vattenmättnadsgraden 96 procent har framställts.

Program

Utveckling av teknik för framställning av block med större höjd pågår och ska fortsätta. Målet är att optimera tryckningsförfarandet för att få bästa kvalitet och mest rationella deponering. Eftersom större block än 50–100 cm höjd inte kan framställas med enaxlig tryckning ska utvecklingen inriktas mot isostatisk pressning. I dag finns i Sverige ingen isostatisk press som är tillräckligt stor för att pressa block i full skala, men prov med isostatisk pressning av block med diametern cirka 100 cm planeras.

Stora komplicerade block med botten och ringar som en enhet kan medföra problem med uppsprickning och sönderfall under processen bevätning/torkning efter deponering. Dessutom innebär sådana block att medeldensiteten och svälltrycket blir högre i botten än runt kapseln, eftersom den skillnad i densitet mellan ringar och cylinderblock som gjorts för Äspö inte kan göras för ett sammansatt block. Dessa båda potentiella problem ska studeras.

17.1.8 Gashalter

Bentonitblocken har vattenmättnadsgraden 70–85 procent, vilket betyder att 70–85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft. Den yttre spalten lämnas ofylld. Luften i ett deponeringshål upptar cirka sex procent av volymen. Osäkerheterna i gashalter är inte betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten.

Den initiala gashalten följer ur vattenhalten och porositeten, se ovan.

17.1.9 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 porvatten- undertryck i de omättade bentonitblocken som driver intransporten av vatten. Detta tryck är av storleksordningen 40 MPa.

17.1.10 Svälltryck

Svälltrycket börjar utbildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med externt vatten, se avsnitt 17.2.7 och 17.2.8. Initialt finns inget svälltryck.

17.1.11 Montmorillonitsammansättning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Ytterligare fysikalisk och kemisk karakterisering aviserades i Fud 2001.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

En metod att bestämma montmorillonitens medelstrukturformel har utvecklats och har använts för Wyoming- och Milosmaterialen. Metoden innebär att montmorilloniten separeras från övrigt material, jonbyts till natriumform varefter ingående metaller bestäms (ICP/AES). Katjonbyteskapaciteten (avsnitt 17.1.6) bestäms för enbart montmorilloniten och används för att beräkna den totala flakladdningen. Ett enkelt Excel-makro har tagits fram för att beräkna montmorillonitens struktur med utgångspunkt från grundformeln för en enhetscell /17-4/.

Program

Teknik för bestämning av det svällande mineralets strukturformel kommer att utvecklas. En väsentlig punkt är att bestämma järninnehållets valensförhållande eftersom detta är avgörande för laddningsfördelningen vid bestämning av strukturen. Vidare är eventuella förändringar som följd av till exempel exponering för luftsyre och torkning av intresse, eftersom detta innebär förändring av den totala flakladdningen. Mössbauer-analys kommer att provas i första hand.

I övrigt se 17.1.6.

17.1.12 Porvattensammansättning

Bentonitlera i naturen innehåller vatten. Efter brytning torkas och mals leran. Vid leverans är vattenhalten maximalt 12 procent enligt specifikation. Före pressning till block tillsätts destillerat vatten för att nå en vattenhalt av 17 procent, vilket motsvarar en vattenmättnadsgrad av 70–85 procent i de färdiga blocken. Koncentrationen av lösta ämnen i porvattnet beror således på mineralsammansättningen i bufferten, samt på vattenhalten vid olika tillfällen. En direkt mätning av utpressat porvatten är inte lämplig, bland annat beroende på att en tryckberoende jonjämvikt utbildas, se avsnitt 17.2.15. Vid materialleverans kommer buffertmaterialet därför att analyseras med avseende på ingående mineral samt på joner i supernatanten hos dispergerat material (vattenlösningen ovanför uppslammat och centrifugerat prov), vilket ger en god uppfattning om porvattnets initialsammansättning.

17.1.13 Föroreningshalter

Bentonit är beteckningen på ett naturligt förekommande jordmaterial med variationer i sammansättningen som beror på bildningssättet. Bentoniten förekommer ofta i olika lager med viss variation i sammansättningen och med mellanliggande lager, vilka kan innehålla andra mineral. I kommersiella produkter, till exempel MX-80, blandas vanligen material från olika lager för att uppfylla specificerade kvalitetskrav. Vanligtvis består föroreningar i bentonit till största delen av mineral som har liten betydelse för förvarets funktion (kvarts och fältspat). Små mängder av till exempel amorft kisel, kalcit, pyrit, siderit och gips kan emellertid ha en viss betydelse för den kemiska utvecklingen i förvarets närområde. Flertalet mineral i bufferten har uppenbara både för- och nackdelar. Ett exempel är kalcit som har en gynnsam pH-buffrande effekt, men som också kan anrikas vid kapseln under inverkan av en kraftig temperaturgradient. För närvarande finns emellertid inget mineral som i vanligt förekommande halter anses ha en avgörande negativ påverkan på förvarets funktion. Sammansättningen hos föroreningarna hos ett buffertmaterial kommer därför sannolikt att tillåtas variera inom vissa gränser mellan olika leveranser av materialet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att det är väsentligt att SKB tar fram acceptanskriterier för övriga mineral och organiska föreningar i leran.

Kasam tycker att det finns anledning att inte bara fastställa allmänna gränsvärden för föreningar utan att också undersöka hur kombinationer av föreningar kan påverka den långsiktiga stabiliteten i bufferten (både positivt och negativt).

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Nyutvecklade analysmetoder, se avsnitt 17.1.6, av mineralfördelningen i bentonit innebär möjlighet till en effektivare materialkontroll vid leveranser med avseende på kostnader, tidsåtgång och noggrannhet. Noggrannheten för enskilda accessoriska mineral är cirka en procent vilket är en avsevärd förbättring. Olika metoder för rutinmässig mätning av totalhalten kol och halten av organiskt kol har provats.

Program

Det är svårt att sätta gränsvärden för föroreningshalter i bufferten. De flesta mineral har ingen eller liten betydelse för funktionen. SKB anser att det är viktigare att visa att förekommande halter av mineral inte allvarligt påverkar förvarets funktion negativt, se avsnitt 17.2.18. Arbetet med att förbättra analysmetoder och rutinmässiga kontroller av bentonit fortsätter inom Lot-projektet och vid undersökningarna av tänkbara buffertmaterial.

Se även avsnitt 17.1.2

17.2 Processer i bufferten

17.2.1 Översikt av processer

Vid inplaceringen kommer bufferten i kontakt med den varmare kapselytan och genom värmetransport sprids värmeenergin genom bufferten och temperaturen ökar. Den gamma- och neutronstrålning som tränger ut ur kapseln minskar i intensitet genom stråldämpning i bufferten.

I buffertens porer råder initialt ett kapillärt undertryck som leder till att vatten transporteras in från det omgivande berget. Efter att bufferten mättats med vatten är transporten mycket långsam. Gastransport kan förekomma vid mätnadsförloppet då ånga kan flöda från buffertens varmare delar för att kondensera i de yttre kallare partierna. Ursprungligen finns även luft i bufferten som genom att lösas i porvattnet kan lämna bufferten. Processen kallas gaslösning. Efter vattenmättnad kan gastransport förekomma om en kapsel skulle skadas med åtföljande vätgasbildning i kapseln.

Vid vattenupptaget sväller buffert och återfyllning varvid ett svälltryck utbildas. Svälltrycket blir olika i buffert och återfyllning. Detta medför att dessa växelverkar mekaniskt. Svälltrycket är avgörande för den mekaniska växelverkan mellan kapsel och buffert som bland annat kan innebära att kapseln rör sig i bufferten. Vid uppvärmningen kan framför allt porvattnet utvidgas genom termisk expansion.

Den kemiska utvecklingen i buffert och återfyllning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. Vattenlösta ämnen kan transporteras genom advektion och diffusion. I bufferten förekommer advektion nästan uteslutande under vattenmätnadsförloppet, därefter dominerar diffusion. Genom osmos kan framför allt salthalten i grundvattnet påverka buffertens fysikaliska egenskaper. Genom jonbyte och sorption kan buffertens ursprungliga innehåll av laddningskompenserande motjoner ersättas av andra jonslag. Kemisk omvandling av buffertens svällande mineral kan förekomma med ändrade buffertegenskaper som följd. Andra mineral omsätts i

bufferten bland annat genom olika lösnings- och fällningsreaktioner. Vid svällningen tränger bufferten ut i det omgivande bergets sprickor och kan där tänkas bilda kolloider som kan föras bort av grundvattnet. Detta kan leda till en successiv erosion av bufferten. Leran kan omvandlas genom strålpåverkan och porvattnet kan sönderdelas av radiolys. Slutligen kan mikrobiella processer tänkas förekomma i bufferten.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer och möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Varken advektion eller kolloidtransport förväntas i en mättad buffert. Radionuklider kan sorberas till lerpartiklarnas ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering. Det radioaktiva sönderfallet bestämmer tillsammans med transportförhållandena i vilken utsträckning radionuklider från en trasig kapsel hinner sönderfalla innan de når buffertens yttre gräns.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i bufferten. Många processer i bufferten är kopplade och behöver studeras integrerat. Sådana studier beskrivs i avsnitten 17.2.12 och 17.2.23, som behandlar buffertens utveckling vid omättade respektive mättade förhållanden.

17.2.2 Stråldämpning/värmealstring

Gamma- och neutronstrålning från kapseln dämpas i bufferten. Dämpningens storlek beror främst av buffertens densitet och vattenhalt. Resultatet blir ett strålfält i bufferten som bland annat kan leda till radiolys av vatten och en marginell påverkan på montmorilloniten. Den strålning som inte dämpas i bufferten tränger ut i närfältberget. Förståelsen av processen bedöms vara tillräcklig för säkerhetsanalysens behov.

17.2.3 Värmetransport

I en vattenmättad buffert transporteras värme genom ledning med väl kända värmelednings-egenskaper. Efter svällning, vid full vattenmättnad, står bufferten i direktkontakt med både kapsel och berg och värmeövergången sker genom ledning.

Värmetransporten i bufferten under mättnadsförloppet är mer komplicerad, bland annat eftersom värmeledningsförmågan beror av vattenhalten och densiteten.

Även värmeövergången mellan kapseln och bufferten blir mer komplicerad eftersom det finns en gasfylld spalt i detta gränsskikt under vattenmättnadsfasen. Spalten kommer att fyllas ut då bufferten sväller men förståelsen av utvecklingen och därmed värmeledningsegenskaperna i spalten är behäftad med osäkerheter.

I KBS-3H och KBS-3V kan det också finnas en luftfylld spalt mellan buffert och berg. Denna spalt har betydelse för värmespridningen i ett tidigt skede av förvarets utveckling.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I beräkningarna av värmetransporten i berget använder SKB en modell med förenklade antaganden om närområdets geometri. Myndigheterna anser att SKB vid presentationen av resultatet bör belysa inverkan av denna förenkling. Myndigheterna menar också att kopplingarna mellan de termiska, mekaniska, kemiska och även hydrologiska processerna i framför allt bufferten behöver studeras vidare.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

En rapport som beskriver hur kapselns resteffekt vid deponering, bergets värmetransport-egenskaper, avstånd mellan kapslar och mellan deponeringstunnlar, värmetransportförhållandena i deponeringshålerna och bergets ostörda geotermiska temperatur tillsammans bestämmer

den maximala temperaturen på kapselytan har tagits fram /17-5/. Resultaten är baserade på kombinationer av numeriska och analytiska metoder, vilket innebär att ett stort antal kombinationer av parametervärden har kunnat analyseras för KBS-3V och för KBS-3H. I den analytiska metoden finns korrektionsfaktorer som bestämts genom kalibreringsberäkningar så att kapslarnas geometri och värmeflödesfördelningen kring kapslarna kan beaktas.

Totalt har den maximala kapseltemperaturen beräknats för omkring 1 000 olika fall. Resultaten presenteras i nomogramform så att man vid givna antaganden om resteffekt, värmeledningsförhållanden och säkerhetsmarginaler direkt kan avläsa vilket kapselavstånd som krävs för att klara temperaturkravet, det vill säga maximalt 100 °C på kapselytan. För något av fallen finns sedan tidigare oberoende, numeriskt framtagna, resultat att jämföra med, till exempel de temperaturberäkningar som gjordes inför SR 97 för Aberg /17-6/. Sedan tidigare finns också oberoende analytiska lösningar /17-7/ som används för jämförelse och verifiering. Alla jämförelser visar på god överensstämmelse.

Den största osäkerheten gäller vilka temperaturmarginaler som ska ansättas. I SR 97 och tidigare har man antagit att effekter av ofyllda gap, framför allt mellan kapsel och buffert, kan ge upphov till temperatursprång på 10 °C. Dessutom bedöms osäkerheter i data motivera en ytterligare marginal om 10 °C, så att den beräknade maxtemperaturen ska vara 80 °C eller mindre. Storleken på det uppskattade temperatursprånget över kapsel-bentonitpalten baseras på antaganden om kopparytans emissivitet, det vill säga förmåga att avge strålningsvärme.

De mätningar som nu pågår i Prototypförvaret ger temperatursprång på, som mest, omkring 19 °C mellan kapsel och buffert. Uppgiften gäller det senast installerade deponeringshålet som vid borrningen och innan installationen kategoriserats som torrt. Omräknat till en standardresteffekt på 1 700 W, och med hänsyn till att effekten reducerats med omkring tio procent när temperaturmaximum inträffar, innebär detta att marginalen för öppna spalter kan behöva vara 17 °C. Den spalt som finns mellan buffert och berg har i Prototypförvaret fyllts med bentonitpellets. I det senast installerade hålet är värmetransporten över den pelletsfyllda spalten cirka sex månader efter installation i stort sett likvärdig med den genom buffertblocken.

Program

De resultat som kommit fram vid platsundersökningarna när det gäller variationer i bergets termiska egenskaper behöver utvärderas så att man kan ta hänsyn till inhomogeniteter i olika skalor på ett lämpligt sätt i den typ av termiska analyser som nu gjorts /17-5/. De termiska analyserna behöver också kompletteras med analyser där man har variabla kapselavstånd, till exempel beroende på att man tvingas förskjuta kapselpositioner för att undgå att skära genom stora sprickor

Problemet med temperatursprång över spalter och behovet av temperaturmarginaler behöver utredas närmare. Dels måste man utvärdera de pågående försöken (Prototypförvaret) dels ska man undersöka vilken reduktion av spelet mellan kapsel och bentonit som behövs för att kunna motivera en temperaturmarginal som är 10 °C eller mindre.

De beräkningsresultat som nu finns tyder på att dataosäkerhetsmarginalen inte behöver vara 10 °C. Vi behöver revidera och uppdatera det experimentella underlaget som ligger bakom det antagna beroendet av bentonitens värmeledningstal av vattenmättnad och porositet /17-8/. Revisionen behövs dels för att reducera dataosäkerhetsmarginalerna vid termisk dimensionering av förvaret, dels för att förbättra de materialmodeller som kommer att användas vid fortsatta THM-modelleringar av vattenmättnadsskedet.

Problemet med värmespridning i buffert kommer att behandlas i de THM-beräkningar som är planerade inom ramen för de olika Äspöprojekten och därmed inom ramen för Äspös internationella arbetsgrupp EBS task force och dess verksamhet.

17.2.4 Vattentransport vid omättade förhållanden

När förvaret förslutits kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Den omättade bufferten kommer att utbilda ett svälltryck som påverkar berget, kapseln och återfyllningen mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bufferten är en komplicerad process som bland annat beror av temperatur, smektit- och vattenhalt i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för vattenmättnad är ett kapillärt undertryck i buffertens porer som leder till ett vattenupptag från berget.

Avgörande för förloppet utveckling är alltså de hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad mellan kapsel och berg inom ett fåtal år. En rad förhållanden i berget har betydelse för vattentillgången.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att det fortfarande saknas entydigt experimentellt belägg som stödjer SKB:s antaganden om buffertens mättnadsförlopp samt att SKB bör visa hur man säkerställer att inflödet av vatten till bufferten blir tillräckligt stort (samt vad höga salthalter innebär). SKI ifrågasätter om SKB kan dra några långtgående slutsatser om bentonitens naturliga återmättnad, som beror på inflödet till deponeringshål, från endast två korttidstester (fem år) i Äspölaboratoriet.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Under de senaste åren har vattentransportprocessen studerats i laboratoriet, i fält och i modellberäkningar. I det följande ges exempel på sådana studier.

De största drivkrafterna för vatten i omättad buffert är porundertrycket och temperaturgradienten. Faktorer som påverkar porundertrycket är därför viktiga för vattentransporten. I ett doktorsarbete studeras hur porundertrycket varierar med initialtillstånd, vattenkvot och svälltryck, se vidare kapitel 17.2.12. Vattentransporten i omättad buffert nära vattenmättnad (vattenmättnadsgrad över 95 procent) har också studerats i laboratorium i samband med undersökningar rörande buffertens bevätning i det planerade fältförsöket Lasgit. Vidare har bevätningssfasen studerats i skalförsök av KBS-3H, varvid en modell i skala 1:10 av en tunnelsektion med två buffertkapsel-paket med tillhörande distanspluggar har byggts.

I fält har dessa processer främst studerats i samband med bevätningen av bufferten i ett flertal fullskaleförsök i Äspölaboratoriet (Prototypförvaret, Återtagsförsöket och TBT). Genom mätning och uppföljning av relativa fuktigheten i ett stort antal punkter kan vatteninflödet och förändringen av porundertrycket bestämmas. I TBT är temperaturgradienten stor vilket gör att den andra stora drivprocessen för vatten, som leder till uttorkning i den varma delen, kan studeras.

En viktig uppdatering av beräkningskapaciteten har gjorts i och med att den på UPC i Barcelona utvecklade finita-element-koden Code Bright har inköpts och testats. Koden är ett utmärkt komplement till Abaqus eftersom den bättre modellerar vissa processer i vattenomättad jord. Den modellerar till exempel omättad jords alla tre komponenter (partiklar, vatten och gas) till skillnad från Abaqus som inte modellerar gaskomponenten (förutom för temperaturdrivet ångflöde). Code Brights välutvecklade modeller medför däremot också att materialmodellerna innehåller fler parametrar som ofta är svåra att bestämma. Mycket arbete återstår med att bestämma och validera dessa modeller för SKB:s buffertmaterial.

Modellberäkningar av vattenflöde har gjorts främst i samband med modellering av fält- och laborieförsöken. Speciellt kan följande beräkningar nämnas:

- Modellering av TBT med befintliga modeller med både Abaqus och Code Bright och jämförelser med mätdata. Utvärdering pågår.
- Modellering av skalförsöket av KBS-3H (1:10) med Abaqus. Bevätningens slutskede gick långsammare än predikterat.

- Uppdaterade beräkningar av Återtagningsförsöket. Utvärdering pågår.
- Modellering av mättnads och mognadsfasen för Lasgit med Abaqus. I dessa beräkningar används en ny och förenklad materialmodell som tagits fram för jord nära vattenmättnad (över 95 procent). Modellen har delvis verifierats genom jämförelser mellan laboratorieförsök och modelleringar av laboratorieförsöken.
- Modellering av de första 1 000 dagarna av Febex-försöket i Grimsel i Schweiz. Bevätningen av bufferten och de termo-hydro-mekaniska effekterna i berget har modellerats och resultaten jämförts med mätningar. De viktigaste resultaten från vattentransportsynpunkt är att buffertens bevätning stämde väl överens med mätresultaten, även för det förenklade antagandet att berget fungerar som ett filter med vattentrycket noll, och förser bentoniten med det vatten den behöver. En annan iakttagelse är att den hydrauliska samverkan mellan berg och buffert inte är så stark som modellerats genom att medierna kopplats ihop. En skinzon behövs för att förklara avsaknaden av negativa vattentryck i berget.

Program

Bevättningsprocessen är en del i den THM-modellering som kommer att ingå i kommande års forskningsprogram. Programmet beskrivs i avsnitt 17.2.12 Integrerade studier av THM-utvecklingen i omättad buffert.

17.2.5 Vattentransport vid mättade förhållanden

Vattentransport i en mättad buffert är ett komplext samspel mellan en rad delprocesser i mikroskopisk skala. På en makroskopisk nivå är resultatet att vattengenomsläppligheten för en mättad buffert är mycket låg och detta är också det väsentliga resultatet för säkerhetsanalysen. Andra osäkerheter rör effekten av omvandlingar, som förväntas ge högre hydraulisk konduktivitet. Även mycket höga salthalter har betydelse för processen, se avsnitt 17.2.15.

Ett specialfall av vattenmättad buffert uppkommer om vattentrycket i bufferten är lika stort som det yttre totaltrycket. Detta innebär att effektivtrycket mellan lerpartiklarna blir noll och bufferten tappar hållfastheten och kommer i flyttillstånd. Detta kan för vissa jordar (lös sand och lös illitisk lera) inträffa vid kraftiga vibrationer eller vattenströmningar, men för högkompakterad bentonit krävs stor yttre påverkan. Fenomenet har observerats vid kompaktering av bentonitblock med hög vattenkvot om kompakteringstrycket varit så högt att bentoniten blivit fullständigt vattenmättad.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI tror inte heller att "liquefaction" till följd av jordbävning är något problem, men frågan behöver bevakas. Man anser att det är viktigt att SKB fortsätter utveckla en THM-modell för vattenmättade förhållanden.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Omfattande laboratorieförsök med olika salthalter och jonslag har genomförts huvudsakligen för bentonit från Wyoming och Milos med syfte att bestämma den hydrauliska konduktiviteten.

Några laboratorieförsök med syfte att påvisa hur flyttillstånd kan uppkomma och vilka effekterna blir har utförts. De har visat att en snabb ökning av vattentrycket inte kan försätta bufferten i flyttillstånd däremot kan en snabb ökning av totaltrycket göra det. Effekterna av flyttillståndet har ännu inte undersökts.

Program

Laboratorieförsök med olika salthalter och jonslag kommer att genomföras för andra tänkbara buffertmaterial. En mindre försöksserie kommer att genomföras vid förhöjda temperaturer.

Flödestester med mätning av hydraulisk konduktivitet och undersökning av påverkan av densitet och porvattensammansättning behöver – utöver de som redan gjorts på MX-80 och Milosbentoniterna – även göras för övriga buffertkandidater, till exempel indiska bentoniter.

Utvecklingen av THM-modellerna för vattenmättad buffert kommer att fortsätta, se avsnitt 17.2.23.

Effekterna av ett (mycket osannolikt) flyttillstånd hos bufferten kommer eventuellt att studeras i ett simulerat deponeringshål med en belastad kapsel i skala cirka 1:40.

17.2.6 Gastransport/gaslösning

I fallet när en kopparkapsel är skadad och vatten kan komma i kontakt med en järninsats kommer vätgas att bildas inuti kapseln. Löst gas transporteras långsamt genom bentonitbufferten och det är mycket troligt att en gasfas och ett gastryck kommer att byggas upp i kapseln. Det är viktigt att kunna visa att detta tryck inte kommer att medföra några negativa konsekvenser för förvarets funktion. Detta innebär att gasen måste kunna ta sig ut utan att skada buffert eller berg.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam anser att det är bra att SKB prioriterar området gastransport i buffertmaterial.

SKI bedömer att Äspölaboratoriet skulle kunna utnyttjas för att demonstrera gastransport genom bufferten i full skala.

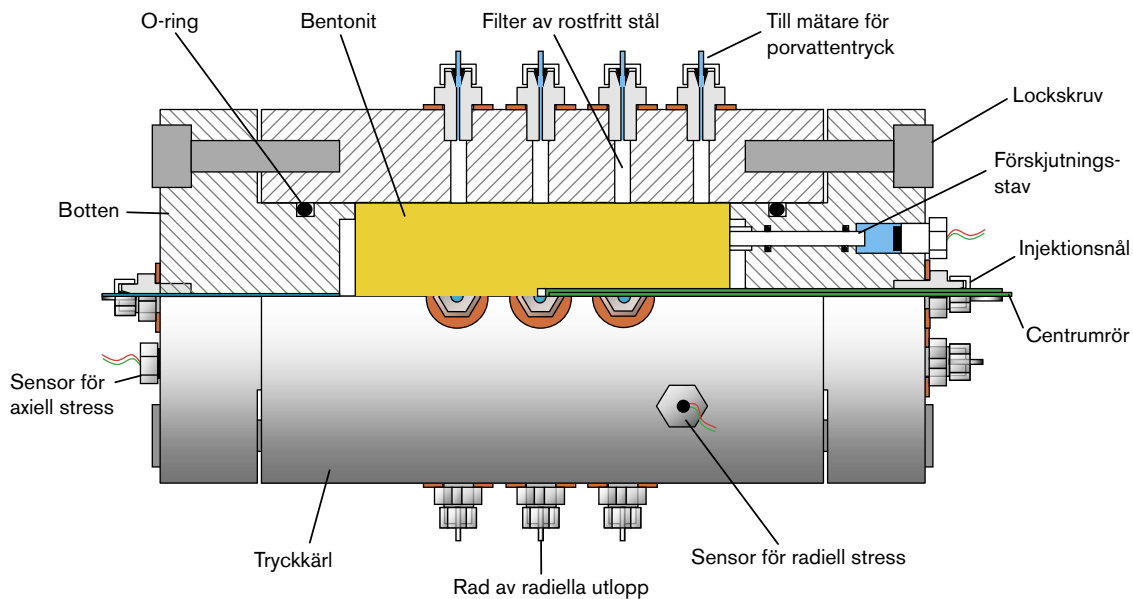
Beträffande gastransport i mättad buffert så är det enligt SKI synnerligen angeläget att fullskaliga och även försök i andra skalor påbörjas och utvärderas på kortare tid än tre år om SKB:s tidsplan ska hålla. Man anser att det tveksamt om kvarstående arbete hinns med fram till den planerade tidpunkten för prövning av tillstånd för slutförvaring och pekar på att det återstår framtagning av validerade modeller för gastransport i mättad buffert, vilket kräver experiment i olika skalor och även en del långtidsförsök.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Den serie av försök med gastransport i bentonit som pågått sedan mitten av 1990-talet har avslutats och slutrapporterats i /17-9/. De frågor som skulle besvaras var:

- Vid vilket tryck kan vätgas tränga in i bentonit?
- Hur mycket porvatten trängs ut av gasen?
- Dispergeras gasen eller transporteras den i diskreta vägar?
- Vad styr riktningen på transporten?
- Vilket är det hösta tryck som gasen kan åstadkomma?
- Kan gasen påverka bufferten negativt?
- Vilken betydelse har randvillkoren för gastransporten?

De senaste experimenten har genomförts i en konstant-volymin-cell med gasinjektering i mitten av provet, se figur 17-1. I cellens väggar finns tre rader med filter för att fånga upp gasen.



Figur 17-1. Utrustning för gasförsök.

Testerna visade att gastrycket kan stiga till värden som var väsentligt högre än summan av svälltrycket och vattentrycket. Detta skiljer sig från de försök som genomförts tidigare. Det är därför uppenbart att randvillkoren är mycket betydelsefulla för resultaten av gastester i bentonit. De högsta uppmätta gastrycken var över 22 MPa, för ett svälltryck på cirka 6 MPa och ett vattentryck på 1 MPa.

Försöksuppsättningen med tre rader av utsläppsfiler visade klart att gasen inte dispergeras jämnt i leran utan väljer att gå i diskreta transportvägar. Dessa vägar är dock inte stabila utan kan öppnas och stängas utan uppenbar anledning.

Försöken har också visat att gasen inte förmår att tränga ut vatten ur bentoniten; 60 liter helium med ett tryck på minst 8 MPa passerade genom ett prov med en diameter på 60 mm och en längd på 120 mm utan mätbar vattenförlust.

Det finns heller ingenting som tyder på att gastransporten skulle påverka bentonitens hydrauliska eller självläkande egenskaper.

SKB har tillsammans med Andra, Enresa, JNC, Nagra och Posiva drivit ett modellutvecklingsprojekt för modellering av gas i bentonit (Gambit). Den tredje fasen av projektet har avslutats. Tyvärr ger inte de experimentella data som finns tillgängliga en klar bild över hur gas transporteras i bentonit. Modellutvecklingen har därför försökt att utgå från olika möjligheter:

1. Bentoniten uppför sig som ett konventionellt poröst media där gastransporten styrs av kapillärtryck och relativ permeabilitet.
2. Gasen transporteras i mikrosprickor i bentoniten
3. Gasen transporteras i makroskopiska sprickor i bentoniten. Detta skiljer sig från punkt 2 i det avseendet att sprickorna är av samma storlek som provet. I punkt 2 är sprickorna avsevärt mindre än provet.

De modeller som tagits fram och testats kan reproducera experimentella data, men det finns uppenbara brister i vissa avseenden. Slutsatsen är att framtida modellutveckling kräver en bättre förståelse av gastransportvägarna i bentonit och kopplingen till spänningstillståndet, gas- och vattentryck samt förekomsten av gasfyllda porer.

Gasnet var ett nätverk inom EU:s femte ramprogram. Syftet var att gå igenom hur frågor kring gas behandlades i säkerhets- och funktionsanalyser. Bland de frågor som togs upp var:

- Korrosionshastigheter i långa tidsperspektiv.
- Mikrobiell gasbildning.
- Utsläpp av kol-14 i gasfas.
- Gastransport i lera.
- Närområdets utveckling.
- Betydelsen av den störda zonen (EDZ).
- Mänskliga intrång.
- Gasens betydelse för vattentransporten.

I dessa frågor finns det fortfarande en hel del osäkerheter i behandlingen i säkerhetsanalyser.

Program

Vår kunskap om gastransport i bentonit baserar sig enbart på experiment i relativt liten skala. En klar slutsats från samtliga projekt inom området är att det är nödvändigt med ett gastransport-experiment i större, helst full skala. SKB har därför beslutat att genomföra ett fullskale-experiment i Äspölaboratoriet (Lasgit). Projektets syfte är att:

- Genomföra och tolka ett storskaligt gasinjekteringsförsök baserat KBS-3-konceptet.
- Utvärdera frågorna kring uppskalning och deras betydelse för gastransport och buffertens funktion.
- Ge ytterligare information om gastransportprocessen.
- Ge högkvalitativa data för testning och validering av modeller.
- Demonstrera att gasbildning inuti en kapsel inte har några påtagliga negativa konsekvenser för barriärerna i förvaret.

Lasgit består av tre faser:

- En installationsfas med design och tillverkning av försökets komponenter, samt deponering av en fullskalekapsel och omgivande bentonit.
- En vattenmättnasfas där avsikten är att mäta bentoniten så fort som möjligt
- Gasinjekteringsfasen kommer att börja när bentoniten anses vara tillräckligt vattenmättad. Tester kommer att göras med konstant tryck eller konstanta flödesförhållanden.

Lasgit startade 2003 och beräknas vara klart 2007–2008.

17.2.7 Svällning

I bufferten och återfyllningen kommer vattenupptaget efter deponeringen att leda till svällning som medför att alla spalter i bufferten, 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 är förhindrad utbildas istället ett svälltryck. Bufferten med sin högre lerhalt kommer att svälla kraftigare än återfyllningen. Detta ger en mekanisk växelverkan mellan buffert och återfyllning i form av att bufferten förväntas tränga upp i den återfyllda tunneln. Buffertrörelser kan också leda till att kapseln rör sig i deponeringshålet. Svällningen leder även till att lera tränger in i bergets sprickor. På lång sikt kan kemiska förändringar i bufferten leda till att svällegenskaperna förändras, se avsnitt 17.2.16 och 17.2.17.

En modell för svällning under vattenmättade förhållanden finns framtagen för finita-element-koden Abaqus sedan tidigare. Svällning förekommer även under vattenmättnadsfasen, se avsnitt 17.2.12.

Svällningsegenskaperna medför att en skada som uppstår i bufferten, till exempel efter piping och erosion, gasgenomträngning eller berg rörelser, kommer att svälla igen och läka.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Processen behandlades inte explicit.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Både teoretiskt och laborativt arbete angående porvattensammansättningens inverkan på svällnings- och svälltrycksegenskaperna har genomförts. Dessa resultat finns redovisade i avsnitt 17.2.15.

Under arbetet med KBS-3H har en modell tagits fram för analytisk lösning av bentonitsvällning genom den perforerade stålbehållaren som omger ett kapsel och buffertpaket. Bentoniten sväller dels ut genom hålen i behållaren och dels in mellan berg och behållare utanför hålen. Beräkningar och försök visar att den utsvällda bentoniten ger en densitet, ett svälltryck och en hydraulisk konduktivitet som är tillräcklig för att effektivt täta mot berget.

Program

Arbetet med laboratorieförsök och modellutveckling för att studera svälltryckets uppbyggnad under bevättningsfasen och dess påverkan på och beroende av porundertrycket kommer att fortgå, se avsnitt 17.2.12 och 17.2.15.

Laboratorieförsök med mätning av svälltryck och undersökning av hur porvattenkemin och densiteten inverkar kommer att göras för andra buffertkandidater.

Kontroll av utsvällning av bentonit genom hålen i den perforerade stålbehållaren i KBS-3H kommer att göras i ett försök där hålgeometri och spaltvidd simuleras i full skala (Big Bertha).

17.2.8 Mekanisk växelverkan buffert/återfyllning

I kontaktytan mellan bufferten och återfyllningen utövar bufferten ett svälltryck mot återfyllningen och vice versa. Eftersom skillnaden i svälltryck är stor uppstår ett nettotryck mot återfyllningen varvid bufferten sväller och återfyllningen komprimeras. Uppsvällningens storlek beror på buffertens och återfyllningens ursprungliga densiteter och avhängiga expansions- och kompressionsegenskaper samt friktionen mot berget. Beräkningsmodeller för analys av denna samverkan finns (både analytiska och numeriska).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI poängterar att SKB måste försäkra sig om att buffertens täthet inte sänks alltför mycket genom att materialet sväller upp och tränger undan återfyllningen i tunneln ovanför (det vill säga ge konstruktionsförutsättningar för återfyllnaden). SKI anser att studier av buffertens mekaniska och reologiska egenskaper är av stor betydelse, framför allt med tanke på växelverkan buffert-kapsel-berg och växelverkan med återfyllningen i deponeringstunneln.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2001

Uppsvällningen av bufferten mot återfyllningen har undersökts för ett alternativt återfyllningsmaterial (Friedlandlera). Beräkningar har gjorts med samma metodik som använts tidigare och med nya mätningar av kompressionsegenskaperna hos Friedlandlera. Resultaten visar att med den låga torrdensiteten $1\,400\text{ kg/m}^3$ som uppnåddes i fältförsöken blir svällningen 0,3 m, vilket kräver en övertäckning av 2,7 m buffert ovanför kapseln (istället för 1,5 m som är dagens koncept) för att inte bufferten runt kapseln ska tappa i densitet /17-10/, se även kapitel 18.

Program

Konsekvenserna av denna växelverkan för andra typer av återfyllnad kommer att utredas på liknande sätt som för Friedlandlera.

Vid brytning av Prototypförvaret kommer konsekvenserna att kunna mätas och jämförelser med beräkningar att kunna göras.

17.2.9 Mekanisk växelverkan buffert/kapsel

Mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel orsakas av buffertens lermatris som generar både tryckpåkänningar och skjuvspänningar, av porvattnet som bara generar tryckpåkänningar och av gas i bufferten som också bara genererar tryckpåkänningar. Under vattenmättnadsprocessen sker förändringar i dessa tre variabler. Sådana kan även ske på grund av yttre påverkan. Kapselns tyngd påverkar bufferten, medan påverkan av buffertens tyngd på kapseln är försumbar. Bergrörelser som uppstår i sprickplan till exempel efter jordskalv ger upphov till påkänningar på kapseln som förmedlas från berget genom bufferten. Processerna vid den mekaniska växelverkan mellan buffert och kapsel efter vattenmättnad förstår man relativt väl. Osäkerheten består framför allt i bevätningens jämnhet och tryckupbyggnaden vid eventuella gasbildningar.

En viktig process är kapselns rörelse i bufferten efter vattenmättnad. Kapselns tyngd ger en kryprörelse orsakad främst av skjuvspänningar i bufferten. Omfattande laborieförsök har gjorts för att studera dessa kryprörelser. En etablerad modell för krypning i lera har visat sig fungera för bufferten och beräkningar med denna modell visar att rörelsen endast blir några millimeter. En osäkerhet i modellen är extrapoleringen till lång tid.

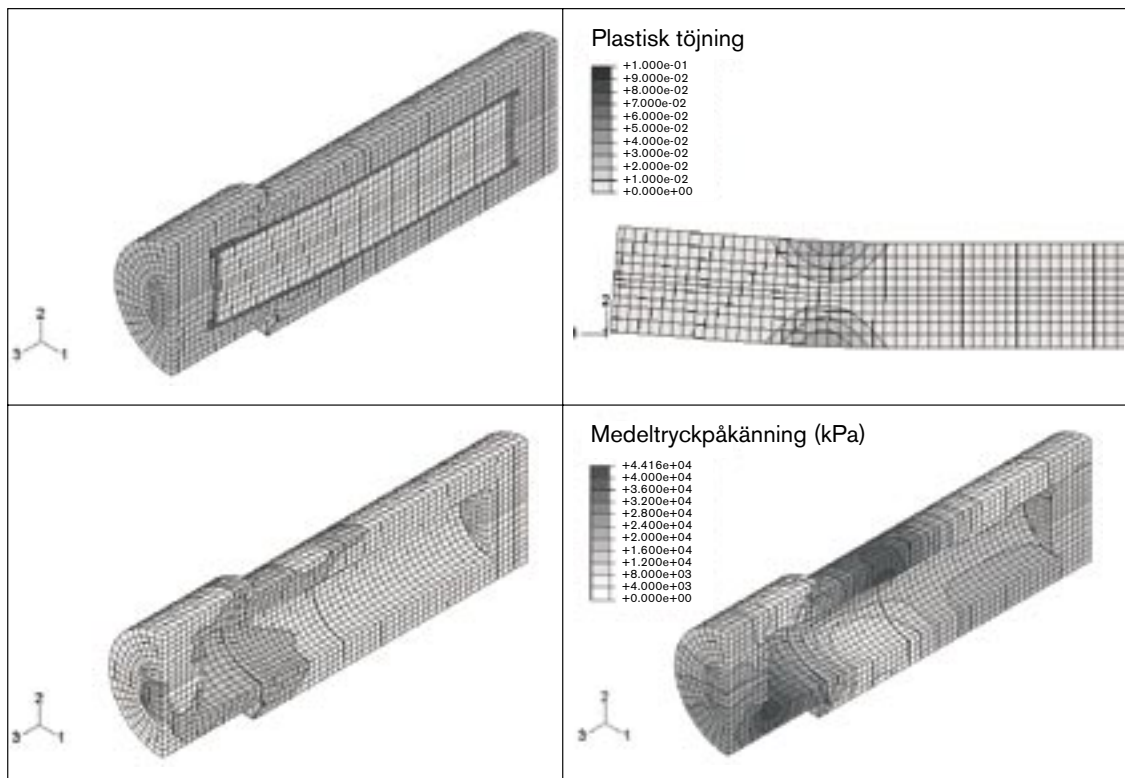
Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att studier av buffertens mekaniska och reologiska egenskaper är av stor betydelse, framför allt med tanke på växelverkan buffert-kapsel-berg och växelverkan med återfyllningen i deponeringstunneln.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2001

Befintliga sprickor som skär deponeringshål kan aktiveras och skjuvas genom ett jordskalv. Inverkan av en sådan bergskjuvning på buffert och kapsel har undersökts i ett projekt som omfattar både laborieförsök och finita-element-beräkningar /17-11, 17-12/.

Bentonitbufferten i ett deponeringshål fungerar som en kudde mellan kapseln och berget, som avsevärt reducerar inverkan av en bergskjuvning; ju lägre densitet desto mjukare buffert och desto mindre påverkan på kapseln. Vid de höga densiteter som föreslås för bufferten i ett slutförvar är den däremot ganska styv. Styvheten är också en funktion av skjuvhastigheten, vilket medför att kapseln kan skadas vid mycket höga skjuvhastigheter.



Figur 17-2. Exempel på resultat från en beräkning med 20 centimeter excentrisk bergskjuvning (densitet vid vattenmättnad $2\,000\text{ kg/m}^3$ och skjuvhastighet 1 m/s). Deformerad struktur (övre vänstra), plastisk töjning i gjutjärnsinsatsen (övre högra), plastisk töjning i bufferten (nedre vänstra) och medeltryckpåkänning (kPa) i bufferten (nedre högra).

För att undersöka styvheten och skjuvhållfastheten hos buffertmaterialet har flera serier laboratorieförsök utförts varvid vattenmättade bentonitprover med olika densitet har skjuvats vid olika skjuvhastigheter. Med hjälp av dessa tester har en materialmodell som tar hänsyn till skjuvhastighet och densitet formulerats. Försöken har utförts med skjuvhastigheter upp till 6 m/s .

Bergskjuvningen har modellerats och beräknats med finita-element-koden Abaqus. Ett tredimensionellt elementnät som modellerar bufferten och kapseln har skapats och ett antal beräkningar som simulerar olika bergskjuvningar har utförts, se avsnitt 16.2.4. Figur 17-2 visar exempel på beräkningsresultat.

Program

Det kan finnas skäl att ytterligare verifiera den modellerade effekten av en bergskjuvning. Behovet av ytterligare försök och möjligheter att genomföra sådana övervägs.

17.2.10 Mekanisk växelverkan buffert/närfältsberg

Den mekaniska växelverkan mellan buffert och närfältsberg orsakas bland annat av svälltryck från bufferten, konvergens av deponeringshål och skjuvrörelser i berget. Konvergens behandlas i avsnitt 19.2.5 Rörelser i intakt berg.

I KBS-3H kommer den yttre containern att korrodera. Omvandlingen från järn till magnetit innebär en volymökning och ett ökat tryck mot berg och kapsel.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inte behandlat.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Effekt av bergskjuvning behandlas i avsnitt 17.2.9.

Teoretiska studier och modellförsök på bentonitens utträngning genom hålen i containern i KBS-3H har lett till en teoretisk modell som kan användas till att optimera hålbilden och förstå hur bentoniten tränger in bakom perforeringen. Hydraulisk konduktivitet hos bentoniten mellan perforeringen och bergväggen har mätts i modellförsöket (skala 1:10) till cirka 10^{-12} m/s vilket är något högre än förväntat med ledning av resultaten från övriga mätningar och från teoretiska beräkningar, men ändå fullt acceptabelt. Modellförsöket beskrivs ytterligare i avsnitt 17.2.12.

Överslagsberäkningar för KBS-3H angående inverkan av ytterligheterna att stålcontainern antingen fördubblar sin volym eller försvinner helt vid korrosionen visar att bufferten kan utformas så att båda ytterligheterna ger en densitet och ett svälltryck som ligger inom de erforderliga värdena.

Program

Det storskaliga laborieförsöket Big Bertha ska för KBS-3H i full skala simulera utsvällningen av bentoniten genom den perforerade containern och samverkan mellan bentonit och den simulerade bergväggen. Svälltryck mot bergväggen ska mätas i ett flertal punkter och tillsammans med provtagning efter brytning ge ytterligare information om hur buffert, container och bergvägg samverkar.

17.2.11 Termisk expansion

Vid temperaturförändringar i bufferten kommer volymen att förändras mer hos porvattnet än hos mineralfasen. Porvattentrycket stiger vid en temperaturökning och temperaturskillnader mellan olika delar av bufferten leder därmed till tryckskillnader, som i sin tur leder till att porvattnet rör sig för att utjämna skillnaderna. I gränsen mot återfyllningen kan processen leda till att bufferten expanderar uppåt. Processen är väl känd för vattenmättad bentonit. För icke vattenmättad bentonit är den termo-mekaniska teorin inte komplett, men konsekvenserna av denna process bedöms i det fallet som oväsentliga för säkerheten. Termisk expansion ingår i den kopplade THM-modellen, se avsnitt 17.2.12.

17.2.12 Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert

När förvaret förslutits kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Vattenupptaget påverkar och påverkas av en rad kopplade termiska, hydrauliska och mekaniska processer. Inom SKB:s program pågår såväl omfattande experimentellt som modellutvecklingsarbete inom området.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam tycker att det är tillfredsställande att SKB genomför forskning på området: bevätning och temperaturdifferenser i bufferten med påföljande värmetransport som funktion av tid och vattenkvalitet.

SSI anser att SKB bör redovisa hur initiala defekter och den kortsiktiga utvecklingen av bufferten i återmättnadsfasen kan inverka på förvarets långsiktiga funktion och i vilken utsträckning försöken i Äspölaboratoriet kan förväntas ge svar på dessa frågor.

SKI anser att en angelägen fråga i sammanhanget är återmättnadsfasen för både buffert och återfyllning, för vilken försöken i Äspölaboratoriet har en viktig roll. SKB behöver förtydliga förväntningarna på experimenten och de utvärderingskriterier som kommer att användas.

SKI ser det som tveksamt om kvarstående arbete hinns med fram till den planerade tidpunkten för prövning av tillstånd för slutförvaring till exempel återstår framtagning av validerade modeller för kombinerad värme- och vattentransport i omättad buffert.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Modellstudier

En integrerad modell för simulering av omättade kopplade THM-processer har tidigare tagits fram och applicerats på finita-element-koden Abaqus. Den modellen har visat sig otillräcklig för vissa applikationer. Bildning, kondensation och transport av vattenånga kan inte modelleras på ett fysikaliskt korrekt sätt, inte heller tryckeffekterna av bildad eller innesluten gas. Både vattenånga och andra gaser har betydelse för värmetransporten och för vattenmättnadsförloppet.

För enkla och idealiserade förhållanden, till exempel om man inte beaktar möjligheten av att vattenånga lämnar bufferten för att kondenseras i återfyllningen, kunde man med de beräkningsmodeller som tidigare användes relativt väl simulera effekterna av temperaturdriven ångtransport utan att explicit modellera ångfasen. Effekter av andra gaser däremot kunde inte beaktas.

Inventering, utvärdering och användning av alternativa beräkningsmodeller har därför gjorts. De koder som testats är Compass, som utvecklats vid University of Wales i Cardiff, och Code Bright som utvecklats vid UPC, Universidad Politécnica de Catalunya, i Barcelona. I dessa koder kan dessutom inverkan av negativa portryck på spänningstillståndet (och därmed de hydromekaniska processerna) hanteras enligt moderna modeller för omättade jordmaterial.

Som ett resultat av utvärderingen har Code Bright valts och anpassats till SKB:s buffertmaterial. Code Bright har utvecklats speciellt för analys av THM-processer i porösa, omättade material. En studie av vattenmättnadsförloppet hos KBS-3V har genomförts och redovisats /17-13/. Resultaten visade att området mellan kapsel och bergvägg vattenmätts inom tre till fyra år, förutsatt att det finns tillgång på vatten av atmosfärstryck i övergången buffert-berg. För att fullt ut kunna beakta inte bara de aspekter på vattenmättnadsförloppet som har att göra med T-H-kopplingar, gasrörelse och ångdiffusion måste emellertid också de hydromekaniska aspekterna beaktas.

Den nya modellen har tillämpats på TBT-försöket i Äspölaboratoriet. TBT-försöket drivs av Andra med SKB som organiserande och verkställande partner och avser THM-processer vid höga temperaturer (över 130 °C). Den nya modellen ger fysikaliskt realistiska resultat, bland annat en avsevärd förångning och uttorkning vid den heta kapselkanten, ångdiffusion i den termiska gradientens riktning och kondensation vid kallare delar av bufferten. De mätresultat som efterhand kommer fram bekräftar modellens relevans /17-14, 17-15/. Effekten av den torra luft som från början finns i porsystemet och i fogar och spalter är inte helt klar, eftersom man inte kan utesluta att delar av den torra luften kunnat läcka ut från experimentet.

Undersökningar av bentonitens hydromekaniska egenskaper, framför allt inverkan av svälltrycksutveckling, mekanisk inspänning och yttre tryck på portryckspotentialen vid ofullständig vattenmättnad pågår. Resultaten kommer att användas bland annat för att bestämma värden till materialparametrar i Code Bright. Med en bättre modell för hur porositetsfördelningen förändras vid utsvällning och kompression, och för hur den omfördelningen påverkar till exempel portryckspotentialen, kommer man att kunna modellera processer kring spalter, till exempel vid övergången mellan berg och buffert, på ett fysikaliskt realistiskt sätt.

Ett flertal modellstudier har också gjorts med Abaqus, se avsnitt 17.2.4.

Fältstudier

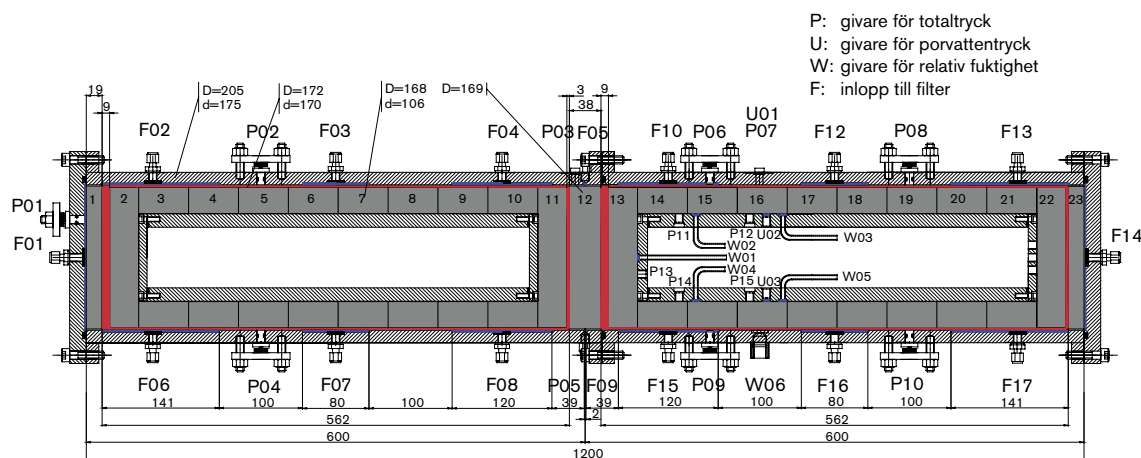
Experimentella studier av de kopplade THM-processerna vid omättade förhållanden har gjorts både i fält och i laboratoriet. I Äspölaboratoriet pågår ett flertal fältförsök där dessa processer mäts under realistiska förhållanden. Prototypförvaret, Återtagsförsöket och TBT-försöket är de främsta exemplen. Dessa försök omfattar både våta och torra förhållanden och kommer att drivas olika lång tid. Detta medför att mätresultaten från installerade givare såväl som mätningar på prover tagna vid kommande urgrävningar kommer att kunna användas för många olika bevättningsfall vid utvärdering av de kopplade THM-processerna bland annat genom jämförelser med modellberäkningar.

Laboratorieförsök

Grundläggande förståelse och samband avseende porundertrycket, svälltrycket under bevätningen och vattenmättnadsgraden undersöks i ett pågående doktorandarbete som ska avrapporteras i år. I detta arbete har laboratorieteknik för mätning av svälltrycket under olika relativ fuktighet utvecklats. Metoderna har använts för att bestämma inverkan av tryck (svälltryck såväl som totaltryck) på porvattenundertrycket. Dessa studier görs bland annat genom att ett prov av omättad bentonit stängs in i en odometer och relativa fuktigheten i provet kontrolleras genom att antingen luft med bestämd relativ fuktighet cirkuleras genom filter som står i kontakt med provet eller att provet omges av en atmosfär med bestämd relativ fuktighet. Genom att ändra relativa fuktigheten stegvis och kontinuerligt mäta relativa fuktigheten i mitten av provet, mäta provets svälltryck och bestämma provets vattenkvot har förståelse för svälltryckets utveckling och dess inverkan på porvattenundertrycket och viktiga samband för materialmodellerna erhållits.

Bevättningsprocessen med tillhörande utsvällning och homogenisering har i laboratoriet studerats för KBS-3H-konceptet. En modell av en deponeringstunnel i skala 1:10 har byggts i laboratoriet. I försöket modellerades en deponeringstunnel med två paket innehållande kapsel, bentonitblock och perforerad stålbehållare samt distanspluggar. Berget simulerades av ett stålrör delvis klätt med filter på insidan för bevätning av bentoniten och för att kunna applicera hydrauliska gradienter mellan filterna och studera det resulterande flödet mellan mattorna. Figur 17-3 visar en genomskärning av försöksuppställningen.

Modellen var instrumenterad med totaltrycksgivare, portrycksgivare och RH-mätare (relativ fuktighet) som fästes dels på det yttre stålröret och dels på den ena kapseln. Ingen uppvärmning av kapslarna gjordes.



Figur 17-3. Genomskärning av försöksuppställningen för KBS-3H-modellen i skala 1:10. P mätning av svälltryck, U mätning av porvattentryck, W mätning av relativ fuktighet, F inlopp till filter. Måtten är angivna i millimeter.

Brytning och utvärdering av bevätningen, homogeniseringen och samverkan mellan buffert och perforerad behållare gjordes ett år efter start. Resultaten visar att bevätningen och tryck-uppbyggnaden i stora drag följde den förväntade men gick långsammare på slutet. För att studera den hydrauliska funktionen av distansblock och övrig buffert applicerades en hydraulisk gradient mellan filterna i olika steg. Den hydrauliska konduktiviteten hos bentoniten bakom perforeringen har utvärderats till cirka 10^{-12} m/s vilket är något högre än förväntat av de svälltryck och den vattenkvot som mättes i modellförsöket och av de teoretiska beräkningarna, men ändå fullt acceptabelt. Andra resultat av modellförsöket var att containern sprack (som förväntat) och att en tydlig påverkan från stålet syntes på bentoniten. Skalförsöket, som pågick i ett år, visade också att fulla svälltryck utvecklades bakom containern men att tryckvariationen var större än vid tidigare mätningar utan container, se även 17.2.10.

Ett tjeckiskt försök i stor skala i laboratoriet (Mock-up Experiment), som stöds av SKB, har startats. Försöket simulerar ett deponeringshål av KBS-3V-typ med buffert och kapsel designade för tjeckiska förhållanden och med följande beståndsdelar:

- Ett berg som simuleras av en 8 mm tjock stålcylder med en innerdiameter av 800 mm och höjden 2 300 mm som invändigt är klätt med ett filter för bevätning.
- En kapsel med ytterdiameter 320 mm och höjden 1 300 mm som innehåller två värmare.
- En omgivande buffert som är 160 mm tjock mellan kapsel och stålcylder. Bufferten är uppbyggd av 70 mm höga sektoriella block som består av en blandning mellan RMN-bentonit (tjeckisk), tio procent silicasand och fem procent grafit.
- En 50 mm tjock spalt mellan bentonitblocken och filterna på stålcyldern. Spalten är fylld med manuellt kompakterad buffert av samma sammansättning som blocken.

Temperatur, tryck, relativ fuktighet och töjning mäts. Försöket startade i maj 2002.

Program

Modellstudier

Programmet med att experimentellt undersöka buffertens termo-hydro-mekaniska egenskaper kommer att fortsätta med tyngdpunkt på att ta fram värden på materialparametrar för användning i Abaqus och Code Bright. Flera av dessa parametrar är svårbestämda och kräver kalibrerings- och verifieringsförsök i laboratoriet. Speciellt för Code Bright behövs en del numeriskt och teoretiskt testarbete för att kunna använda kodens hydro-mekaniska modeller på ett ändamålsenligt sätt. Det doktorsarbete som nu pågår för att undersöka hur porttryckspotentialen påverkas av mekanisk inspänning kommer att vara en viktig utgångspunkt för fortsättningen. Speciellt måste parametrar som har att göra med hur portalsförändringar påverkar porttryckspotentialen bestämmas. Även temperaturgradientförsök med kontrollerade gastrycksförhållanden behöver göras.

Även resultat av försök som görs utomlands, till exempel av CEA, i Andras regi och av Enresa kan utvärderas och utnyttjas för att bredda det experimentella underlaget. CEA:s försök görs på MX-80-bentonit som utsätts för stora temperaturgradienter och avser en av de viktiga processerna, nämligen omfördelning av ursprungligt vatteninnehåll genom värmedriven ångtransport.

I TBT-försöket fortsätter arbetet med tillämpad simulering. I samband med att data genereras och trender i försöket blir tydliga, kommer en fas av utvärderingsmodellering att inledas. Syftet är att utvärdera relevansen hos modellerna som användes vid de blinda prediktioner som gjordes i samband med att försöket startades. Utvärderingsmodelleringen sker i samarbete med modelleringsgrupper som organiseras av Andra och Enresa.

Efterhand som materialmodellerna utvecklas tillämpas de i Code Bright- och Abaqus-modelleringar av Prototypförvaret, Återtagsförsöket, Återfyllning och pluggning samt Lasgit. Modelleringsarbetet drivs dels inom de olika projekten, men kommer även att ingå

i ett samverkansprojekt där modelleringsgrupper från olika organisationer medverkar (EBS Task Force).

Modelleringsarbetet bedrivs också i form av simulering av pågående fältförsök (se nedan) och samhörig uppföljning och analys av mätresultaten. Modellering av Buffer-Container-experimentet i URL i Kanada och modellering av fortsättningen av Febex-försöket i Grimsel i Schweiz kommer också att göras, bland annat genom medverkan i Task A i Decovalex 4.

Fältstudier

Fältstudierna bedrivs genom uppföljning av de pågående projekten Prototypförvaret, Återtagningsförsöket och TBT-försöket (Temperature Buffer Test) i Äspö. Brytning av den yttre sektionen i Prototypförvaret planeras ske 2008 och brytning av Återtagningsförsöket med test av återtagsteknik i vissa delar planeras ske 2007.

Laboratorieförsök

Parallellt med modellstudierna och uppföljning och modellering av fältförsöken kommer laboratorieförsöken på vattenomättad bentonit att fortsätta med avsikten att bättre förstå de omättade processerna och få underlag för att bestämma parametervärden i befintliga modeller. Följande försökstyper planeras i första hand:

- Ödometerförsök på omättade prover med kontrollerat porundertryck i bentoniten (olika konstant relativ fuktighet). Dessa försök görs för att bestämma en del parametrar i den mekaniska modellen i Code Bright.
- Försök med konstant volym och mätning av porundertryck och svälltryck vid förändrat vatteninnehåll. Kompletterande försök för ytterligare verifiering och parameterbestämningar hos den modell som är under utveckling (av sambandet mellan porundertryck, vattenmättnadsgrad, portal och svälltryck).
- Försök med temperaturgradienter applicerade över bentonitprover under kontrollerade former. Syftet med dessa försök är att förbättra modellerna för vattenomfördelning i en temperaturgradient.
- Försök med ångtransport respektive vattentransport genom omättade prover. Bevättningshastigheten mäts dels genom att applicera förhöjd relativ fuktighet (RH) på en sida av ett bentonitprov och mäta intransporten av vatten, och alternativt genom att applicera fritt vatten på en sida av ett bentonitprov. Proverna hålls vid konstant volym under försöken. Syftet med försöken är att få bättre underlag för ång- och vattentransportmodellerna.
- Tester av bevättningsförloppet nära full vattenmättnad. Tiden till full vattenmättnad synes vara längre än förväntad i en del fall, beroende på att processerna i slutfasen av vattenmättnadsförloppet inte studerats närmre.

För att verifiera förloppet av svällning, utträngning och homogenisering under buffertens samverkan med den perforerade containern i KBS-3H ska ett försök i nästan full skala göras i laboratorium. En del av en deponeringstunnel med berg, perforerat rör och bentonit simuleras. För att minska dimensionerna men ändå hålla full skala på de testade delarna ska endast bentonitdelen testas det vill säga ingen kapsel medtages. Det innebär att en stålcyllinder med innerdiametern 0,8 m och längden cirka 1,0 m används för att innesluta och beväta bentoniten det vill säga för att simulera berget. För att underlätta brytningen kommer röret att göras axiellt delbart. Deponeringscontainerns utformning (tjocklek och hål) och alla spalter görs i full skala. För att kontrollera bevättningsförloppet ska totaltryck och relativ fuktighet (RH) mätas i bentoniten i 6–10 punkter. Givare placeras dels på ytterröret och dels i centrum av bentoniten. Även volym inströmmat vatten mäts. Försöket planeras starta 2004 och brytas 2006.

Fortsatt uppföljning och utvärdering kommer att göras av det tjeckiska laboratorieförsöket i stor skala i (Mock-up Experiment). SKB är med och stöder både försöket och utvärderingen.

17.2.13 Advektion

Lösta ämnen kan transporteras med porvatten genom tryckinducerat flöde (advektion). 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 17.2.14. Vattenflöde i bufferten under omättade och mättade förhållanden behandlas i avsnitt 17.2.4 och 17.2.5.

17.2.14 Diffusion

Lösta ämnen kan transporteras i stillastående porvatten genom diffusion. Därigenom rör sig ämnen från områden med högre koncentration till områden med lägre. Processen leder till omfördelning av lösta ämnen i porvattnet och påverkar alltså porvattensammansättningen.

Diffusionsprocessen är starkt sammankopplad med nästan alla kemiska processer i bufferten, genom att den svarar för fram- och borttransport av reaktanter och reaktionsprodukter. Därmed är diffusion en central process för hela den kemiska utvecklingen i bufferten. Processen ingår som en del i avsnitt 17.2.23 avseende buffertens kemiska utveckling samt i avsnitt 17.2.25 vad gäller radionuklidtransport.

17.2.15 Osmos

Buffertens fysikaliska egenskaper, bland annat svälltryck och hydraulisk konduktivitet, är intimt kopplade till bentonitens förmåga att uppta och binda vatten. Bindningskraften hos bentonitmaterial beror huvudsakligen på andelen montmorillonit samt på variationer i montmorillonitens mineralstruktur. För ett givet bentonitmaterial avtar bindningskraften med ökande mängd absorberat vatten. Sambandet kan mätas och brukar beskrivas med en så kallad vattenhållningskurva. Även andra komponenter i ett förvarssystem, till exempel omgivande berg, salt i grundvattnet och bakterier, kan binda vatten i olika grad varvid konkurrens om vattnet uppstår. Bentonitens svälltryck påverkas därigenom vilket kan beskrivas kvantitativt med hjälp av termodynamik, till exempel i form av osmotiskt tryck.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att SKB har en god insikt i processerna svällning och osmos i bentonitleran.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Förhållandena i ett deponeringshål med bentonit och grundvatten är typiska för system som kan beskrivas med Donnanjämvikt, vilken karakteriseras av att någon ingående jon inte fritt kan diffundera i systemet, vanligtvis på grund av jonens storlek. I högkompakterad bentonit är det de laddade enskilda montmorillonitflaken som har en mycket begränsad rörlighet på grund av sin storlek och den stora mängden flak. Förutsättningarna för jämvikt i ett sådant system är att produkten av diffunderbara joners kemiska aktivitet är lika i grundvattnet och i porvattnet mellan bentonitflaken, och att elektrisk neutralitet råder i båda avdelningarna. Mineralflakens naturliga och förhållandevis höga negativa laddning kompenseras av motjoner. I kompakterad bentonit innebär fördelningen mellan bentonit och vatten en motjonkoncentration på flera mol per liter. Jonprodukten mellan mineralflaken kommer därför att domineras av montmorillonitens motjoner. En ökning av grundvattnets jonkoncentration leder därför till en betydligt mindre ökning av jonkoncentration mellan mineralflaken. Skillnaden i koncentrationsökning innebär en ny osmotisk jämvikt, vilket innebär en reduktion av bentonitens svälltryck. Tryckändringarna kan beräknas eftersom aktiviteten hos motjoner och joner i grundvattnet kan bestämmas.

Omfattande laboratorieförsök har genomförts i samarbete med Posiva, Finland. Resultaten visar att tryckberäkning med hjälp av Donnanjämvikt väl beskriver förhållandena för ett stort spann av natriumkloridkoncentrationer och bentonitdensiteter /17-16/.

Bentonit med naturligt hög halt av natriumklorid på grund av exponering för havsvatten har undersökts i samarbete med Enresa i Barra-projektet /17-17/. Huvudsyftet med tester och analyser var huvudsakligen att studera bentonitens stabilitet vid långvarig exponering för höga salthalter. Natriumkloridhalter på över två mol per liter uppmättes i de flesta analyserade prov. Svällningsförsök genomfördes med rent vatten efter avsaltning och med natriumkloridhalter på upp till tre mol per liter. Resultaten uppvisade tryckförhållanden som över ett brett densitetsområde var snarlika de som uppmätts för MX-80.

Program

Laboratorieundersökningar av osmotiska effekter vid andra jonslag än natrium (i första hand kalcium) har påbörjats och kommer att slutföras under kommande period. I försöksprogrammet ingår olika bentonitmaterial samt bentonitdensitet och jonkoncentration som variabler. För varje enskild jonjämvikt bestäms svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Ett mindre antal försök kommer att genomföras vid förhöjda temperaturer. Utveckling av teorin för Donnanjämvikt och effekterna på svälltryck och jonkoncentrationer i bufferten kommer att fortgå.

Resultaten från laborieförsöken förväntas även ge information om porstrukturen i bentoniten, vilken kommer att kompletteras med specialanalyser av testmaterialet, bland annat med hjälp av röntgen.

17.2.16 Jonbyte/sorption

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB konstaterade att buffertens fysikaliska egenskaper i hög grad påverkas av joninnehållet i porvattnet. Under de kemiska förhållanden som förväntas råda i ett djupförvar är det framför allt den totala salthalten och utbyte från natriumjoner till kalciumjoner som kan påverka egenskaperna i nämnvärd omfattning.

SKI framhåller att SKB bör värdera vad salta grundvatten betyder för förvaret.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Effekten av totalt jonbyte har undersökts för bentonit från Milos (Ibaco Deponit CA-N) och från Wyoming (MX-80). Materialen har undersökts i sin naturliga form, vilket är huvudsakligen kalcium för Milosmaterialet och natrium för Wyomingmaterialet. Båda materialen har därefter renats på accessoriska mineral och jonbytt till både kalcium- och natriumform. Montmorillonitens mineralstruktur har beräknats, och svälltryck samt hydraulisk konduktivitet har bestämts för olika densiteter. Resultaten visar att båda bentoniterna har i stort sett identiska egenskaper efter jonbyte, samt att skillnaden i egenskaper vid buffertdensitet är minimal oberoende av jonslag. Svällningspotentialen för materialen som jonbytt till kalciumform var emellertid påtagligt mindre, vilket leder till sämre buffertegenskaper vid låga densiteter.

Geokemisk modellering av jonbyte hos ett MX-80 material som följd av exponering för grundvatten från Äspö har gjorts inom Lot-projektet /17-18/.

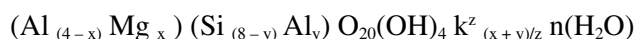
Program

Effekter som följd av jonbyte kommer att studeras under den kommande perioden genom laborieförsök med andra tänkbara buffertmaterial, samt med material med lägre kvalitet. Geokemisk modellering kommer att fortsätta med slutmålet att kunna beskriva effekten av vattenmättnadsfasen och av temperaturgradienter. Sannolikt behöver laborieförsök genomföras för att bestämma jämviktskonstanter för kompakterad bentonit vid förhöjda temperaturer.

17.2.17 Montmorillonitombildning

De önskvärda fysikaliska egenskaperna hos bufferten, främst svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, beror på samverkan mellan vatten och montmorillonit-mineralet i bentoniten. Denna samverkan påverkas av ändringar i jonkoncentrationen i grundvattnet, se avsnitt 17.2.15, och av ändringar i montmorillonitens mineralstruktur. Den mineralogiska stabiliteten hos montmorilloniten är därför av avgörande betydelse för buffertens funktion.

Montmorillonit kan vara stabil i hundratals millioner år i sin bildningsmiljö, men förändringar i den geokemiska miljön kan leda till en relativt snabb förändring av mineralstrukturen. Montmorillonitens ideala strukturformel kan skrivas:



Summan av x och y kan variera per definition mellan 0,4 och 1,2 enheter (laddning per $\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ -enhet), och $x > y$. En viss andel aluminium (Al) kan betraktas som utbytt mot magnesium (Mg), och en mindre del kisel (Si) är utbytt mot aluminium (Al). Utbytet av trevärt aluminium mot tvåvärt magnesium leder till en negativ nettoladdning i mineralflaken som balanseras av utbytbara katjoner (k).

I naturen förekommer mineral med likartad struktur men med stora skillnader i flakladdning. Om laddningen (x+y) är nära noll (till exempel pyrofyllit) är samverkan med vatten obetydlig vilket ger radikalt andra egenskaper än hos montmorillonit. En ökning av flakladdningen och därmed fler balanserande katjoner leder till större samverkan med vatten. Om flakladdningen ökar tillräckligt mycket kan jonerna bindas hårdare till mineralet och samverkan med vatten minskar därmed. Slutmineralet i en sådan serie har flakladdningen 2 per $\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ -enhet (glimmer). De typiska egenskaperna hos montmorilloniten är således en följd av en medelhög flakladdning.

Inbindning av laddningsbalanserande joner beror till hög grad av jonens egenskaper. Kaliumjoner binds till exempel in vid lägre flakladdning än natriumjoner, vilka i sin tur binds vid lägre laddning än kalciumjoner. Illit avser material med en flakladdning mellan den hos montmorillonit och glimmer. Kaliumjoner binds till viss del i en illit-lera men inte natrium- eller kalciumjoner. Inbindning 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,
- förändring av valens i strukturen (järn).

Vid en eventuell omvandling kan sekundära processer ha betydelse för buffertens funktion. Frigörelse av kisel skulle sannolikt leda till utfällningar av olika kiselmineral, vilka kan påverka buffertens reologiska egenskaper (cementering).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam ser det som värdefullt om SKB i samband med sina studier av andra sammansättningar också undersökte hur en begränsad illitiserings respektive cementering påverkar för bufferten viktiga parametrar.

SKI anser att mineralombildningarna borde studeras i laboratorium och att cementering under det omättade skedet är en väsentlig process.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Omfattande laboratorieexperiment har genomförts för att studera buffertens stabilitet vid mycket höga pH-förhållanden i grundvattnet. Undersökningen var en del i EU-projektet Ecoclay vilket hade som syfte att belysa effekterna av cementanvändning i ett slutförvar. Resultaten visar att montmorilloniten påverkas kraftigt av cementporvatten från färsk Portlandcement, det vill säga vid pH värden mellan 13 och 14. En kraftig frigörelse av kisel uppmättes och därmed en ökning av flakladdningen och densitetsförlust hos bulkmaterialen. Vid lägre pH visade resultaten en väsentlig skillnad mellan högkompakterad bentonit och bentonit dispergerad i lösning. En preliminär tolkning är att en gynnsam jonjämvikt utbildas mellan högkompakterad bentonit och pH-lösningen, se avsnitt 17.2.15.

Program

Utvärdering och publicering av resultat från Ecoclay-projektet pågår. Resultaten bedöms som mycket värdefulla. Sannolikt kommer ytterligare modellering och verifieringsförsök att genomföras.

Laboratieförsök med naturliga material med lägre kvalitet än kommersiella bentoniter planeras. Undersökningarna avser mineralogisk beskrivning samt bestämning av fysikaliska egenskaper hos bland andra naturliga material med olika omvandlingsgrad, till exempel kaliumbentonit från Röstånga, Skåne.

Förändringar av buffertegenskaperna som följd av reaktioner med järn i bentonit planerar SKB att studera ur två aspekter:

- Valensförändring i oktaederskiktet i mineralstrukturen kommer att studeras med hjälp av diffusionsförsök med reducerande och oxiderande lösningar.
- Inbindning av järn som laddningskompenserande motjon och/eller som centraljon för en hydroxidbrygga mellan mineralflaken, detta till följd av korrosion av omgivande järn.



Figur 17-4. Naturlig redoxfront i Angerias bentonitbrott på ön Milos i Grekland.

17.2.18 Lösning/fällning föroreningar

Buffertmaterialet, består förutom av montmorillonit bland annat av andra så kallade accessoriska mineral som här räknas till materialets föroreningar. I förvarsmiljön kan dessa lösas upp och ibland åter fällas ut beroende av vilka förhållanden som råder. Buffertens egenskaper kan därvid förändras.

Merparten av de tänkbara processerna är i sig väl kända och kan modelleras för mindre komplicerade system. Förhållandena i bufferten med avseende på transport och reaktionskinetik är emellertid inte helt klarlagda för alla processer. Transport av ämnen kan ske i olika form och kan i dag inte helt beskrivas. Speciellt finns kvarstående modelleringsproblem under vattenmättnadsfasen då vatten transporteras både i gasfas och som vätska. Modellering av systemet måste därför kopplas till de THM-processer som pågår parallellt med transport- och reaktionskinetik.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam anser att det finns ett behov av fortsatta studier kring frigörelse, transport och utfällning av löst kisel och andra ämnen i bufferten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

I Lot-testerna i Äspö utsätts buffertmaterial för stora temperaturgradienter (maximalt 130 till 80 °C över ett avstånd på 10 cm). Material från de tre genomförda ettårsförsöken har analyserats i ett stort antal punkter med avseende på bland annat fördelning av grundämnen och reologiska egenskaper. Resultaten visar att en minimal omfördelning av kisel och magnesium ägt rum. Förändringarna var så små att de inte går att relatera till specifika mineral. Bentoniten var generellt sett något mer plastisk efter försöket, vilket visar att ingen cementering hade ägt rum i huvuddelen av bufferten. En tydlig utfällning av framför allt gips konstaterades däremot på den simulerade kopparkapseln och i de innersta en till två millimetrarna av bentoniten. Geokemisk modellering av omfördelning av mineral i ett MX-80 material som följd av exponering för Äspö-grundvatten har gjorts inom Lot-projektet /17-18/.

Program

De pågående långtidsförsöken inom Lot-projektet förväntas ge svar på frågan om utfällningarna beror på förångning av inkommande vatten under vattenmättnadsfasen, eller om processen fortgår även efter full vattenmättnad. Det senare är tänkbart eftersom bland annat gips och kalcit har minskande löslighet vid ökande temperatur.

För närvarande pågår fyra långtidsförsök inom Lotprojektet. Enligt ursprungsplanen kommer ett högtemperaturförsök att brytas under våren 2005, vilket innebär en exponeringstid på fem år. År 2006 planeras ett femårsförsök med KBS-3-temperatur att avslutas. De resterande två försöken kommer enligt nuvarande plan att drivas under betydligt längre tid.

Fortsatt geokemisk modellering planeras inom Lot-projektet, dels med avseende på omfördelning av mineral, och dels med avseende på omvandling av montmorillonit.

17.2.19 Kolloidfrigörelse/erosion

Uppskattningarna i SR 97 antyder att risken för erosion av stora mängder bentonit är liten, både vad gäller kemisk och mekanisk erosion. Processen bör dock studeras ytterligare. En kvarstående fråga är betydelsen av mycket låg jonstyrka hos grundvattnet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI saknar processen erosion av buffertmaterialet i Fud-programmet, men anser att SKB har tagit de nödvändiga initiativen för komma framåt i kolloidfrågan (till exempel med hjälp av Kolloidprojekt i Äspölaboratoriet).

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Försök gjorda i samband med KBS-3H-studier har visat att piping från vattenförande sprickor med åtföljande erosion kan vara ett problem innan bufferten har blivit vattenmättad. Dessa fenomen är speciellt allvarliga för KBS-3H, eftersom de kan drabba alla kapselpaket som installeras i tunneln ”nedströms” den vattenförande sprickan. Men detta kan även tänkas drabba enskilda deponeringshål i KBS-3V. Nedanstående beskrivning avser dock främst KBS-3H.

Om det inrinnande vattnet orsakar piping och erosion hos bufferten kan det leda till att bufferten inte tätar utan att vattenströmningen måste stoppas på annat sätt. Bascenariot är att 0,1 liter/minut rinner in i en sektion med ett deponeringspaket i en KBS-3H-tunnel och att uppbyggnaden av vattentrycket i berget är cirka 100 kPa/timme om inflödet stoppas. Hur än denna inrinning sker är det troligt att bentoniten innanför den perforerade containern inte kan stoppa inflödet utan att alla spalter först fylls ut från botten i samma takt som distansblocket sväller och hindrar vidare uttransport. Efter minst cirka tio dagar har spalterna fyllts, distansblocket svällt (i huvudsak som gel) ut mot berget. Den sista delen som förväntas svälla är vid taket. När denna del också tätats kan inte vattnet ta vägen någonstans utan trycket i sprickan byggs då upp. Om trycket byggs upp för snabbt hinner inte bentoniten svälla tillräckligt snabbt utan piping uppstår hos gelen och erosion kan starta om flödet är stort.

Dessa fenomen har studerats både i grundläggande laboratorieförsök och i modellförsök i olika skala. De förra gjordes antingen med konstant flödes hastighet eller konstant vattentryck i borrade hål med diametern 2–4 millimeter genom 5–10 centimeter långa bentonitkutsar. Resultaten visade att endast mycket låga vattenflödes hastigheter eller mycket låga vattentryck kunde stoppas av bentoniten. Eftersom dessa försök kan ses som konservativa ytterligheter gjordes modellförsök, först i skala 1:10 sedan i full skala. Modellförsöken i skala 1:10, där spalten i toppen på det simulerade distansblocket var fyra millimeter, gav till resultat att en trycköknings hastighet av cirka 200 kPa/timme var övre gränsen för att inte piping skulle uppstå, men också att vattenuppfyllnadshastigheten var en viktig parameter. Vid övergång till full skala visade det sig emellertid att högst 5 kPa/timme klarades eftersom spalten där var fyra centimeter. Samtidigt var läckaget under uppfyllnaden mycket stort. Kraven kan alltså inte uppfyllas utan ingenjörslösning och vid det senaste försöket i full skala applicerades en krage på ”berget”. Kragen sattes fast i ”berget” och dess ringformade skiva gjordes så stor att den stängde av spalten mellan ”berget” och distansblocket och sträckte sig ytterligare fem centimeter in i distansblocket. Denna konstruktion klarade 50 kPa/timme upp till 2 MPa tryck utan att piping uppstod och utan att något läckage uppstod innan uppfyllningen var klar.

Slutsatsen är alltså att en spalt i storleksordningen flera centimeter inte kan hantera basscenariot utan en ingenjörslösning, men också att det borde vara fullt möjligt att antingen göra kringkonstruktioner som klarar kraven eller att göra distansblock som har mindre spalter mot berget (till exempel tredelade block med kilform).

Inom Kolloidprojektet har oberoende försök genomförts vid två laboratorier samt vid fältförsök i Äspö. Resultaten visar entydigt att spontan dispergering av montmorillonit från en bentonitbuffert inte sker om kalciumkoncentrationen i grundvattnet överstiger 1 mM. Resultaten kompletterar och bekräftar tidigare undersökningar både kvalitativt och kvantitativt /17-19/.

Problemställningen kring spontan frigörelse av montmorillonit är därmed sannolikt reducerad till koncentrationen av tvåvärda joner i grundvattnet.

Program

Försöken med piping och erosion för KBS-3H ska fortsätta både i liten skala och i full skala för att öka förståelsen för dessa processer. Om det visar sig svårt att garantera att inte piping uppstår måste en serie erosionsförsök göras med syfte att kunna uppskatta mängden eroderande bentonit i olika situationer.

Kvantitativ modellering av möjlig borttransport av montmorillonitkolloider från bufferten planeras.

17.2.20 Strålinducerad montmorillonitomvandling

Montmorillonit i bufferten kan brytas ned av gammastrålning. Resultatet blir en minskning av montmorillonithalten. Experiment har visat att den ackumulerade stråldosen bentoniten kommer att utsättas för i ett djupförvar inte orsakar några mätbara förändringar av montmorillonithalten.

17.2.21 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 väggjocklek är dock tillräcklig för att effekten av gammaradiolys på utsidan ska bli försumbar, se avsnitt 17.1.4.

17.2.22 Mikrobiella processer

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB konstaterade att mikrobiella processer under vissa förhållanden kan resultera i att gaser och sulfider bildas. Gasbildning kan leda till störande mekanisk påverkan på bufferten och sulfid kan korrodera kopparkapseln. Sulfidbildning måste ske i bufferten nära kapseln och vara betydande för att korrosionsangrepp ska bli möjliga, främst beroende på att lösligheten av sulfid är mycket låg och därmed även den diffusiva transportkapaciteten. Det är också känt att bakterier kan binda och transportera metaller i jonform. För att de ovan beskrivna processerna ska ske måste emellertid bakterierna vara aktiva och ha tillgång till vatten, näring och utrymme.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Inget nytt har tillkommit sedan föregående utredning i samband med Lot-projektet i Äspö /17-20/, se även avsnitt 16.2.12.

Program

Brytning av pågående femårsförsök med mikrober i bentonit inom Lot-projektet under 2005.

17.2.23 Integrerade processer – utveckling vid mättade förhållanden

Integrerade modellstudier för bufferten vid mättade förhållanden genomförs för den samlade kemiska utvecklingen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att SKB borde uppdatera THMC-kopplingarna – i synnerhet de kemiska aspekterna – med resultaten från de senaste temperaturberäkningarna.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

De THM-studier av integrerade processer som genomförts på vattenmättad buffert sedan Fud 2001 är följande:

- Inverkan av snabba tryckstötter på bufferten, se avsnitt 17.2.5.
- Effekt av jordbävning inducerad bergskjuvning genom deponeringshål, se kapitel 17.2.9.

Ingen ytterligare utveckling av materialmodellen THM för mättade förhållanden har hunnits med.

Program

Den mekaniska delen av THM-modellen för vattenmättad bentonit är komplex och har vissa kvarstående frågor, både vad beträffar parametervärden och modell. Den består egentligen av två modeller: En som hanterar sambanden mellan spänningar och deformationer och en krypmodell som hanterar tidsberoendet. Modellerna används för att modellera:

- Samverkan mellan buffert och återfyllning.
- Homogeniseringen av bufferten.
- Kapselns rörelse i bufferten med tiden.

Arbetet med dessa frågor och uppföljning av modellutvecklingen kommer att fortsätta.

Tester för att studera inverkan av tryckstötter kommer att fortsätta, se även avsnitt 17.2.5 och 17.2.9.

17.2.24 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.

17.2.25 Radionuklidtransport – diffusion

Transporten av radionuklider genom bufferten sker med olika diffusionsmekanismer. Det är klarlagt att vissa katjoner kan ha höga diffusiviteter (transporteras effektivare). En möjlig förklaring till fenomenet är teorin om ytdiffusion. Processen hanteras i säkerhetsanalysen genom att ansätta högre diffusivitetsvärden för cesium, strontium och radium.

När bentonit har så hög densitet att de elektriska dubbellagren mellan två plan överlagras uppträder ett fenomen kallat anjonexklusion. Anjoner kan inte tränga in i de interlamellära porerna på grund av de elektrostatiska krafterna mellan de negativt laddade ytorna och anjonen. Anjonexklusion minskar avsevärt den tillgängliga porositeten för diffusion av anjoner. Vid höga salthalter blir effekten av anjonexklusion mindre och i blandningar av bergkross och bentonit är den försumbar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI ifrågasätter om det är korrekt att beskriva ytdiffusionsprocessen genom att sätta högre diffusiviteter på cesium, strontium och radium, se även avsnitt 17.2.26.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ett antal laboratorieförsök har genomförts för att i detalj undersöka olika processer som påverkar jondiffusion i bentonitlera. Anjondiffusion i bentonitlera som packats till olika torr densiteter har undersökts /17-21/. Resultaten antyder att anjondiffusion i bentonitlera består av två processer, en snabb och en långsam. Förklaringen som föreslagits är att den snabba diffusionsprocessen är diffusion mellan bentonitskikten, medan den långsamma är diffusion mellan bentonitpartiklarna, där anjonerna i viss grad sorberar till kantpositioner på montmorilloniten och/eller till andra mineraler i bentoniten.

Diffusion i bentonitlera har undersökts i två in-situ-experiment i Äspölaboratoriet: Chemlab och Lot. Chemlab är ett borrhålslaboratorium där diffusionsförsök genomförts med katjoner (Cs^+ , Sr^{2+} och Co^{2+}) och anjoner (I^- och TcO_4^-) i bentonit och med naturligt grundvatten. Vattnet togs från en spricka i samma borrhål som försöket utfördes i /17-22/. Den redoxkänsliga perteknetatjonen (TcO_4^-) diffunderade oreducerad, trots att den termodynamiskt borde reduceras och fällas ut som $\text{TcO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ /17-23/. På vissa ställen var teknetiumaktiviteten emellertid avsevärt högre. Aktivitetstopporna tillskrivs järninnehållande mineraler där Tc(VII) har reducerats till Tc(IV) och fällts ut. Katjonerna Sr^{2+} , Cs^+ och Co^{2+} , liksom anjonen I⁻, uppförde sig på samma sätt som i ett laboratorieförsök.

I Lot-försöken /17-24/ placerades cylindriska bentonitblock runt ett kopparrör i ett fyra meter djupt vertikalt borrhål. Hålet förseglades sedan och bentonitblocken lämnas i hålet i ett år, fem år eller betydligt längre än fem år. När bentoniten är vattenmättad uppvärms kopparröret för att simulera energin som frigörs vid radioaktivt sönderfall i det utbrända kärnbränslet. Bentonit som dopats med radioaktivt cesium och kobolt placerades i ett av de understa blocken. När försöket avslutats togs det aktivitetssinnehållande bentonitblocket till ett radiologiskt laboratorium, där aktivitetsfördelningen i blocket bestämdes. Aktivitetsfördelningen var för båda katjonerna som förväntats från laboratoriestudier.

Resultaten från laboratorie-, Chemlab- och Lot-försöken ger en entydig bild av diffusionsbeteendet hos de studerade jonerna. Erhållna data, det vill säga diffusiviteter och distributionskoefficienter överensstämmer väl i de tre olika studierna.

Program

SKB avser att utvärdera en alternativ beskrivning av diffusionsprocessen i bentonit med utgångspunkt från jonjämvikt. De överlappande elektriska dubbellagren innebär att laddningskompenserande motjoner finns i hela utrymmet mellan mineralflaken. Eftersom endast motjonerna kan diffundera fritt kommer jonbalansen med omgivande grundvatten att styras av motjonkoncentrationen, avsnitt 17.2.15. Detta leder till lägre koncentration av grundvattenjoner i bentoniten än i det omgivande grundvattnet. Katjonerna från grundvattnet kan emellertid ersätta de ursprungliga laddningskompenserande katjonerna genom jonbyte. Anjonerna kan däremot inte ersätta de negativt laddade mineralflaken varför koncentrationen av introducerade anjoner blir lägre än koncentrationen av introducerade katjoner (anjonexklusion). Den högre koncentrationen av introducerade katjoner leder till en större koncentrationsgradient och därmed till en snabbare diffusiv transport (ytdiffusion). Fördelen med denna beskrivning av diffusion i bentonit, om den visar sig korrekt, är att den medger en teoretisk kvantifiering och ökar den konceptuella förståelsen.

Transportmotstånd för radionuklider i gränssnittet mellan bentonit och vattenförande spricka /17-25, 17-26/ kommer att prövas experimentellt. I planerna ingår experiment i både laboratorium och in-situ. De senare kommer att utföras i Chemlab-sonden.

17.2.26 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.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam anser att det bör vara möjligt att åstadkomma en mer sofistikerad sorptionsmodell (jonbyte, adsorption, yttutfällning av radionuklider som funktion av koncentration, och pH).

SKI ifrågasätter SKB:s sätt att avfärda sorptionsprocessen på det sätt som gjorts i Fud 2001.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Resultat från in-situ-försök med Chemlab-sonden har beskrivits i avsnitt 17.2.25.

Som ett underlag till SR-Can har SKB tagit fram en uppdaterad rapport vilken beskriver diffusion och sorption av radionuklider i bentonit /17-27/. Rapporten innehåller de data som ska användas i analysen och en detaljerad beskrivning av osäkerheter i data. De flesta diffusiviteter har valts utgående från diffusionsförsök med HTO, vilka är okänsliga för de yttre parametrarna. Termodynamiska sorptionsmodeller har använts för de radionuklider där underlaget är tillräckligt bra.

Program

SKB anser inte att sorption i bentonit är ett prioriterat forskningsområde. Inför varje ny säkerhetsredovisning kommer dock befintligt material att uppdateras med ny information.

17.2.27 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 avsnitt 15.2.14 och utvecklingen av den kemiska miljön i bufferten i avsnitt 17.2.23. I SR-Can genomförs samma typ av specieringsberäkningar för bland annat buffertmiljön som i SR 97.

17.2.28 Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit

Bufferten ska förhindra att kolloider med radionuklider tränger ut från en skadad kapsel.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att SKB bör utreda betydelsen för säkerhetsanalysen av att organiska kolloider kan diffundera genom bufferten, samt om samma fenomen gäller för oorganiska kolloider.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Diffusion av organiska kolloider i bentonit har studerats i en doktorsavhandling /17-28/. Syftet med avhandlingen var att få kunskap om organiska kolloiders sorption och diffusion i kompakterad bentonit, samt att undersöka om bentonit är en effektiv barriär för kolloider. Radionuklidens transportegenskaper i bentonit kan förändras vid närvaro av kolloider på grund av att speciering och sorptionsegenskaper ändras. Det visade sig att humussyror, till skillnad från bentonitkolloider, är stabila i granitiska grundvatten. Trots att humussyror ger negativt laddade och relativt stora aggregat, diffunderar de lätt genom kompakterad bentonit (diffusivitet D_e cirka 10^{-11} m/s). Experimenten visar att humussyra diffunderar i hela provvolymen, det vill säga både intralamellärt och i utrymmen mellan partiklar. Transporten av Eu(III) av Co(II) i bentonit ökar markant när humussyra-kolloider är närvarande medan transporten av Sr(II) är opåverkad.

Program

Det är viktigt att kolloider som bildas inuti kapseln filteras i bentoniten. Enligt /17-28/ är det uppenbart att organiska kolloider inte filtreras av bentoniten på samma sätt som oorganiska kolloider. Förståelsen av kolloiders egenskaper i bentonit kommer att kräva ytterligare insatser.

18 Återfyllning

Återfyllningen i tunnarna är ingen barriär i sig själv i KBS-3-konceptet. Den är däremot nödvändig för att bufferten och berget ska få önskad funktion. De krav som ställs på återfyllningen är:

- Återfyllningen ska ha en styvhet som minimerar buffertens expansion uppåt. Därigenom bibehålls buffertens densitet.
- Återfyllningen ska ha en hydraulisk konduktivitet som är jämförbar med den i det omgivande berget. Deponeringstunnarna kan annars utgöra konduktiva vägar som påverkar vattenomsättningen i förvaret.
- Återfyllningen ska uppnå ett visst svälltryck mot taket för att bibehålla en svällförmåga som kan täta eventuella effekter av kanalbildning och kryprorelser i återfyllningen.

Återfyllningen får inte ha någon negativ påverkan på barriärerna i förvaret vilket ställer en del krav på den kemiska sammansättningen.

SKI påpekar i sin granskning av Fud 2001 att återfyllnaden är en förutsättning för att bufferten ska fungera som avsett och att närområdesberget inte kortsluts som barriär mot grundvattenströmning. SKI uppmanar därför SKB att skyndsamt fastlägga de krav och kriterier som måste ställas på återfyllnadsmaterialet så att det inför en tillståndsprovning kan tas fram underlag och metoder som visar hur dessa krav är uppfyllda (till exempel materialval, applikationsteknik och kontrollmetoder).

18.1 Initialtillstånd för återfyllningen

18.1.1 Variabler

För att beskriva återfyllningen används i stort sett samma variabler som för bufferten, se tabell 17-1.

18.1.2 Geometri

Återfyllningens mått ges av måtten hos tunnarna.

18.1.3 Porgeometri

Den initiala porgeometrin (porositeten) hos återfyllningen följer trivialt av dess materialspecifikation.

18.1.4 Strålintensitet

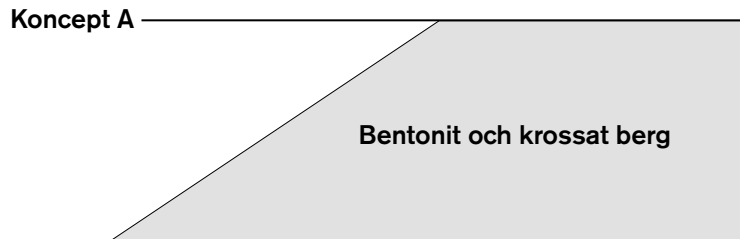
Den initiala strålintensiteten i återfyllningen är försumbar.

18.1.5 Temperatur

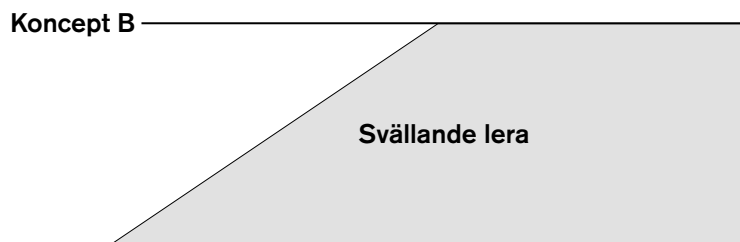
En bestämning av den initiala temperaturen i återfyllningen är trivial. Denna kommer att vara nära bergets initiala temperatur.

18.1.6 Smektithalt

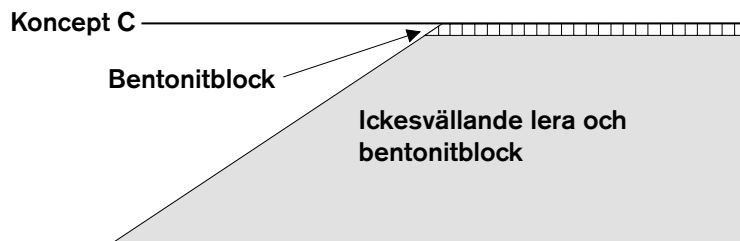
SKB tillsammans med Posiva studerar för närvarande ett antal olika koncept för tunnelåterfyllning /18-1/. De koncept som för närvarande är aktuella för analys i SR-Can är antingen en 30/70-blandning av buffertmaterial och bergkross som kompakteras in-situ, eller blockpressad Friedlandlera, se figur 18-1.



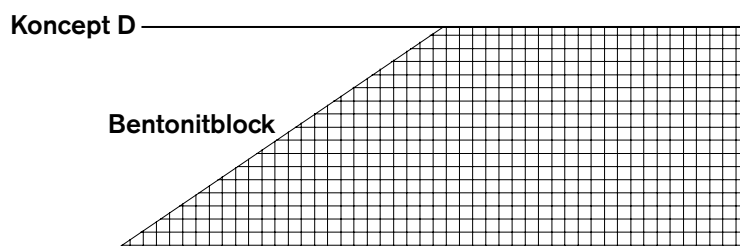
Det ursprungliga referenskonceptet: bentonit (samma som till buffert) blandad med krossat berg.



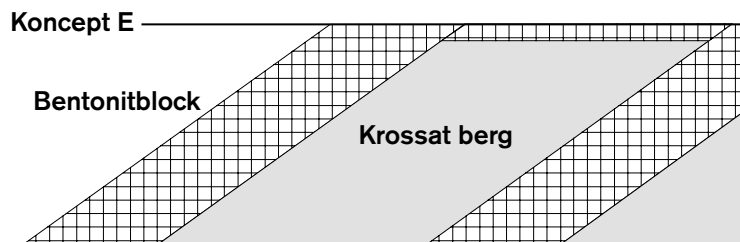
Svällande lera som kompakteras på plats i tunneln. Friedlandlera används som referens för närvarande, men många olika leror skulle kunna vara tänkbara.



Icke-svällande lera med bentonitblock i taket.



Svällande lera som kompakteras till block och placeras i tunneln. Friedlandlera används som referens för närvarande, men många olika leror skulle kunna vara tänkbara.



Block av bentonit av buffertkvalitet som varvas med krossat berg i ett kompartmentsystem.

Figur 18-1. Olika koncept för återfyllnad som för närvarande utreds.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI påpekar att en väsentlig fråga som måste ha lösts innan en ansökan för byggande av slutförvaret lämnas in är slutligt val av lämpligt återfyllningsmaterial, speciellt valet av lerkomponenten.

Kasam poängterar att material med olika egenskaper kan behövas i olika utrymmen.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Se avsnitt 18.2.2.

Program

Se avsnitt 18.2.2.

18.1.7 Vattenhalt

Den initiala vattenhalten i återfyllningen följer trivialt av dess materialspecifikationer. Det är en parameter som kan kontrolleras vid blandningen av materialet.

18.1.8 Gashalter

Den initiala gashalten i återfyllningen följer trivialt av dess specifikationer.

18.1.9 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gastryck. Initialt är det relevant att beskriva gas- och vattentryck. Flöden förekommer inte initialt i återfyllningen. Vid inplaceringen är förvaret öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av en atm (cirka 0,1 MPa) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa i omgivningen. Däremot kommer det att liksom hos bufferten finnas ett initialt porvattenundertryck i den omättade återfyllningen, som driver intransporten av vatten tillsammans med övertrycket från vattnet i berget. Detta porundertryck beror av vilket koncept som väljs.

18.1.10 Svälltryck

Svälltrycket börjar utbildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med externt vatten. Initialt finns inget svälltryck.

18.1.11 Smektitsammansättning

För närvarande finns flera alternativa återfyllningskoncept och återfyllningsmaterial, se avsnitt 18.1.6. I vissa av koncepten består lerdelen av samma material som bufferten, se avsnitt 17.1.2, och i andra koncept av ett helt annat material, till exempel Friedlandlera.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 18.1.6.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Se avsnitt 18.2.2.

Program

Se avsnitt 18.2.2.

18.1.12 Porvattensammansättning

Vattnet i återfyllningen är en blandning av vatten från bergkrosset (om koncept A väljs), bentonitens ursprungliga vatten samt vatten som tillsätts vid blandningen. Dess sammansättning beror till största delen av vilket vatten som tillförs.

18.1.13 Föroreningshalter

Mängden och sammansättningen av föroreningar beror till största delen på vilket återfyllnads-koncept som väljs. För varje koncept måste konsekvenserna av dessa föroreningar utvärderas.

En relaterad fråga är betydelsen av främmande konstruktionsmaterial och kvarglömt material i tunnlarna, se avsnitt 18.2.16 (allmänt), 17.2.17 (järn och cement) och 19.2.19 (cement).

Program

Se avsnitt 18.2.16, 17.2.17 och 19.2.19.

18.2 Processer i återfyllningen

18.2.1 Översikt av processer

I återfyllningen sker i princip samma processer som i bufferten dock ibland i en annan omfattning. Dessutom spelar det eventuella bergkrosset (definierat som förorening i återfyllningen) en delvis annan roll än buffertens föroreningar, bland annat genom att bidra till sorptionen. I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i återfyllningen.

18.2.2 Integrerade studier – sammansättning och funktion

Återfyllningens egenskaper bestäms, förutom av sammansättningen, även av salthalten i grundvattnet. Saltinnehållet har stor betydelse för egenskaperna, vilket beror på att både svälltryck och hydraulisk konduktivitet bestäms av bentonitens egenskaper i utrymmet mellan det krossade berget (koncept A och eventuellt koncept D). Eftersom bentonitdensiteten är låg i vissa koncept blir egenskaperna mycket känsliga för saltinnehållet. Detta medför att den ursprungliga sammansättningen 15 procent bentonit och 85 procent bergkross kunde vara lämplig för en plats med ett sött grundvatten medan en plats med saltare vatten kan kräva en högre andel bentonit. Återfyllningens exakta sammansättning kommer att väljas när nödvändiga data finns tillgängliga från den aktuella platsen.

Återfyllningens funktion i allmänhet identifierades som ett prioriterat forskningsområde i Fud 2001. Kraven på återfyllningens funktion (svälltryck, konduktivitet) kopplar starkt till dess halt av smektit eller andra svällande mineral.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att SKB i god tid bör förvissa sig om hur användbara resultaten från projektet Backfill and Plugg Test i Äspölaboratoriet är för att välja återfyllnadsmaterial och för att utreda växelverkan mellan återfyllnad och buffert i deponeringshålen.

SSI påpekar att SKB bör redovisa betydelsen av återfyllnaden för förvarets långsiktiga skyddsförmåga och vilka forsknings-, utvecklings- och demonstrationsinsatser som behövs för att bygga upp tillräckliga kunskaper för säkerhetsanalysens behov.

Kasam anser att om de olika kraven på återfyllningen visar sig svåra att förena bör dess funktion att begränsa utsvällningen av bufferten prioriteras.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Studier av återfyllning sker främst inom ramen för tre projekt som genomförs i Äspö-laboratoriet, nämligen Backfill and Plug Test, Återfyllning och förslutning av tunnlar och berggrum samt Prototypförvaret. Separata studier har också gjorts av det alternativa återfyllningsmaterialet Friedton.

Projektet Backfill and Plug Test innebär ett test i full skala av koncepten A och C, se figur 18-1. Installationen avslutades under slutet av 1999 /18-2/.

I Backfill and Plug Test har en 28 meter lång tunnelsektion återfyllts och instrumenterats. Halva tunnallengden återfylldes med en blandning av 30 procent bentonit och 70 procent krossat berg (30/70-blandningen). Den andra halvan återfylldes med 100 procent krossat berg (0/100-blandningen) och med bentonitblock placerade närmast taket. Återfyllningen lades ut och packades lagervis med vibratorplattor som utvecklats och byggts för detta ändamål. Tekniken med packning av lutande skikt användes i hela tunnelsektionen från golv till tak med lutningen cirka 35 grader. Återfyllningen avdelades med permeabla mattor ungefär varannan meter med syfte att beväta återfyllningen konstgjort och att kunna applicera en hydraulisk gradient mellan mattorna för flödestestning. Återfyllningen och omgivande berg har instrumenterats med cirka 200 givare för mätning av vattentryck, totaltryck och vatteninnehåll med mera. En tunnelplugg av betong med en halv meter tjock O-ring av bentonit har installerats i slutet av testsektionen.

En utvärdering av installationen visade att utrustningen och tekniken för återfyllning och packning fungerade väl, både avseende funktion och erhållen densitet, men pålitligheten, hållbarheten och säkerheten hos packningsutrustningen behövde förbättras. Fastän torrdensiteten hos 30/70-återfyllningen blev lägre än $1\,650\text{ kg/m}^3$ nära bergväggarna och taket uppskattas att medeltorrdensiteten blev mellan $1\,650$ och $1\,700\text{ kg/m}^3$. Den mätta medeltorrdensiteten hos 0/100-återfyllningen blev $2\,170\text{ kg/m}^3$.

Vattenmättnad av återfyllningen påbörjades efter avslutad installation och bedömdes vara klar på våren 2003, det vill säga efter cirka 3,5 år. För att påskynda bevätningen i 30/70-blandningen tillsattes salt i det vatten som matade bevätningmattorna, så att en medelsalthalt av 1,2 procent skulle uppnås efter full vattenmättnad. Dessutom lades ett 500 kPa vattentryck på i bevätningmattorna.

Mätresultaten av vattenmättnadsförloppet stämde väl överens med modellberäkningarna när den modell av den omättade hydrauliska konduktiviteten som kalibrerats fram i laboratorieförsök användes. Däremot skiljer den i modellen använda hydrauliska konduktiviteten sig från den som mätts i laboratorium på vattenmättade prover med konstant gradient i ödometrar. Orsaken bedöms främst vara den inhomogenitet som återfyllningen har /18-3/, men detta kan även bero på skillnaden i försöksteknik.

Återfyllningen i Prototypförvaret är snarlik den 30/70-blandning som används i Backfill and Plug Test. Skillnaden mellan materialen består i att mald natriumkonverterad kalciumbentonit från Milos använts i stället för den naturliga natriumbentoniten MX-80 /18-4/. Den med densitetsmätare mätta medeldensiteten hos återfyllningen var $1\,750\text{ kg/m}^3$ emedan medeldensiteten, uppskattad genom att dividera den intransporterade mängden återfyllning och den tillgängliga volymen, var endast $1\,630\text{ kg/m}^3$. Detta beror förmodligen på packningsproblem i delar med många instrument och kablar och på lägre densitet nära väggar och tak.

Bevätningen av återfyllningen från berget mäts med inplacerade psykrometrar och ger värdefull information om hydraulisk samverkan mellan berget och återfyllningen.

Projektet Återfyllning och förslutning av tunnlar och berggrum har som mål att utveckla material och tekniker för återfyllning och förslutning av djupförvar för använt kärnbränsle av KBS-3-typ. Målet för fas 1, som endast består av tekniska utredningar och avslutats i början av 2004, var att beskriva vilka förutsättningar de föreslagna återfyllningskoncepten har för att möta de krav som SKB och Posiva formulerat, välja ut de mest lovande koncepten för vidare studier och beskriva metoder för att verifiera återfyllningskonceptens funktion. De föreslagna återfyllningskoncepten skiljer sig från varandra gällande återfyllningsmaterial och installationsmetod (packning av materialet på plats i tunneln, inplacering av block eller en kombination av båda metoderna) och beskrivs översiktligt i avsnitt 18.1.6.

Bedömningen av koncepten har baserats på funktionskrav som formulerats för att säkerställa en säker miljö för kapsel och buffert under djupförvarets drifttid. Dessa krav tillsammans med antagna förhållanden i djupförvaret (salthalt i grundvatten med mera) utgör basen för de konstruktionsförutsättningar som använts för att jämföra och diskriminera koncepten. Konstruktionsförutsättningarna rör krav på återfyllningens kompressibilitet, hydrauliska konduktivitet, svälltryck, långtidsstabilitet, negativa effekter på barriärerna i slutförvaret samt bedömning av om installationen är tekniskt genomförbar. Riskerna samt behovet av vidare studier för de individuella koncepten har också behandlats i fas ett.

De huvudsakliga rekommendationerna kan summeras på följande sätt: Koncept A och B, se figur 18-1, som bygger på packning på plats i tunneln ska studeras vidare i nästa fas av projektet för att undersöka om tillräckligt hög densitet kan uppnås för de aktuella materialerna. Koncept D har goda möjligheter att uppfylla de ställda kraven, men det är ett nytt återfyllningskoncept och en del osäkerheter rörande materialval, tillverkning och inplacering av block behöver därför undersökas i nästa fas. Designen och funktionen av det heterogena konceptet E skiljer sig från de övriga koncepten. Detta koncept kommer tills vidare inte att utredas ytterligare, men en del av de arbeten som kommer att göras för de andra koncepten kan användas för att bedöma koncept E, om det skulle visa sig vara av intresse. Koncept C, där återfyllningsmaterialet till största delen består av ickesvällande lera, kommer inte att utredas vidare eftersom det har bedömts som osannolikt att det kan uppfylla de ställda kraven.

Ett alternativt återfyllningsmaterial som studerats ingående är den naturliga montmorillonitrika leran Friedton. Studier har gjorts dels i form av laboratorieförsök /18-5/ och dels i form av packningsförsök i fält /18-6/.

Resultaten visar att den hydrauliska konduktiviteten är tillräckligt låg vid den densitet som uppmätts i fälttesterna och för den salthalt som förutses i grundvattnet. Däremot ger den uppnådda fältdensiteten en kompressibilitet som är för hög för att förhindra att uppsvällningen av bufferten i deponeringshålen blir för stor. Fältförsöken visade också att det är svårt att applicera materialet så att en spalt vid taket undviks. Tillredningen av materialet och packningstekniken borde dock kunna förbättras så att tillräcklig densitet kan uppnås i fält.

Program

Studier av återfyllningar kommer huvudsakligen att fortsätta drivas inom de tre beskrivna projekten.

Projektet Backfill and Plug Test har, i och med att återfyllningen är vattenmättad, kommit in i en ny fas med flödes- och kompressionstester. Vattentrycket i återfyllningen, som i dag är 500 kPa genom trycksättningen i filtermattorna, kommer successivt att sänkas och flödet mellan mattorna att mätas. Genom att mattorna nära taket och nära golvet separerats från mattan i centrala delen i varje sektion kan hydrauliska konduktiviteten hos återfyllningen mätas i dessa olika delar. Efter avslutade flödestester ska kompressibiliteten mätas med de fyra tryckcylindrar som fästs i golvet och taket.

Parallellt med fälttesterna kommer modellering av testerna att göras för att försöka förstå flödesvägarna i återfyllningen och kopplingen till bergets egenskaper. Dessutom kommer

kompletterande laboratorieförsök att göras för att bättre förstå inverkan av testteknik och inverkan av inhomogeniteter i återfyllningen.

I Prototypförvaret kommer uppföljningen av bevätning och svälltrycksutveckling i återfyllningen att fortsätta. Genom modellering av processerna och jämförelser med mätresultaten kan värdefull information fås om den hydrauliska samverkan mellan berg och återfyllning. Kompletterande laboratorieundersökningar kommer också att göras. Brytning av yttre sektionen planeras ske 2008.

Projektet Återfyllning och förslutning av tunnlar och bergrum fortsätter med nästa fas som innebär att de utvalda alternativen och materialen studeras närmre. Laboratorieförsök för att bestämma de hydrauliska och mekaniska egenskaperna samt packningsegenskaperna ska göras på alternativa material såsom Milos kalciumbentonit och Ashapurabentonit (indisk). I fas tre ska teknik att packa på plats i tunneln, blocktryckning (koncept D) och blockinplaceringsteknik studeras. Återfyllningens hydrauliska samverkan med berget och eventuella problem med piping och erosion ska också undersökas. Fas två pågår till 2005 varefter pilotförsök med prototyp-utrustning kommer att genomföras för att verifiera och förbättra inplacerings- och packningsteknikerna med några utvalda material och koncept. I fas fyra planeras ett storskaligt fältförsök med målet att verifiera återfyllningens funktion.

18.2.3 Stråldämpning och värmealstring

Processen kan försummas i återfyllningen.

18.2.4 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Slutsatsen är oförändrad att återfyllningens temperatur bestäms av det omgivande berget som har högre värmeledningsförmåga. Återfyllningens egen värmetransportkapacitet inverkar bara genom att närområdets genomsnittliga effektiva värmetransportmotstånd blir något större om transportkapaciteten är låg. Tunnelnarnas volymsandel av närområdet är dock så liten att förändringar i återfyllningens bidrag till värmetransportmotståndet ger obetydliga effekter på temperaturen, såväl i återfyllningen själv som i bufferten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Temperaturutvecklingen i återfyllningen i Prototypförvaret mäts och följs upp i många punkter. Dessa mätresultat kan tillsammans med temperaturutvecklingen i övre delen av bufferten i deponeringshålen användas för att verifiera att värmetransporten i återfyllningen modelleras på ett relevant sätt.

Program

Mätningarna och utvärderingarna av temperaturutvecklingen i Prototypförvaret fortsätter. Värmeledningstalet kan beräknas teoretiskt. Dessa beräkningar bör göras även för de nya återfyllningskoncepten och kontrolleras med några laboratoriemätningar.

18.2.5 Vattentransport vid omättade förhållanden

Det är möjligt att återfyllnaden kommer att vara den huvudsakliga vattenkällan till bufferten i vissa deponeringshål.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Ej behandlat.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Vattenuptagningen i återfyllningen mäts i Äspölaboratoriet inom projekten Backfill and Plug Test (vattenmättnad uppnådd) och Prototypförvaret. Modellering och laboratorieförsök har gett bra information om parametrarna som driver denna transport, se avsnitt 18.2.2.

Program

Inom ramen för SR-Can kommer återmättnadsfasen i återfyllningen att modelleras. Resultatet från detta arbete kommer att ge randvillkor för beräkningarna av buffertens återmättnad.

Studier av omätnad vattentransport kommer att ske inom ramen för de projekt som hanterar återfyllning enligt avsnitt 18.2.2.

18.2.6 Vattentransport vid mättade förhållanden

Vattengenomsläppligheten hos återfyllningen efter vattenmättnad bestäms av innehållet av montmorillonit och andra lermineral, sammansättningen av porvattnet och densiteten. Till skillnad från bufferten kan återfyllning av bergkross blandat med bentonit inte bli höggradigt homogen, dels beroende på att blandningsförfarandet inte ger jämn fördelning av komponenterna bentonit och bergkross, dels för att utläggning och packning inte kan göras lika effektiv över återfyllningens hela tvärsnitt och längd.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Slutsatsen är oförändrad att för bentonitblandad återfyllning finns ett antal osäkerheter. Egenskaperna är mätta direkt efter blandning. Risker för och effekten av eventuell homogenisering av bentonitdensiteten i ballastporerna är inte kända. De uppmätta hydrauliska konduktiviteterna förutsätter att inga kanaler eller glipor finns. Även effekterna av mycket höga salthalter behöver utredas mera.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Egenskaperna hos mättad återfyllning undersöks när det gäller bentonit-ballast-blandningar främst inom projektet Backfill and Plug Test, och för övriga återfyllningskoncept främst inom projektet Återfyllning och förslutning av tunnlar och bergrum, se avsnitt 18.2.2.

För återfyllning med en blandning av bentonit och bergkross är homogeniteten en viktig faktor för den uppnådda hydrauliska konduktiviteten. Även försöksvillkoren och därmed spänningstillståndet i återfyllningen i tunneln är betydelsefulla. En jämförelse mellan uppmätt och teoretiskt beräknad hydraulisk konduktivitet, det senare med antagandet att bentoniten är helt jämt fördelad i porutrymmet mellan bergkrosskornen, visar att den mätta permeabiliteten i allmänhet är högre. Ju lägre bentonithalt och ju högre salthalt i det tillsatta vattnet desto större skillnad /18-3/. En homogenisering med tiden skulle alltså minska permeabiliteten.

Program

Undersökningar av mättad hydraulisk konduktivitet hos blandningar ska fortsätta och sker främst inom projektet Backfill and Plug Test medan undersökningarna för övriga koncept i huvudsak görs inom projektet Återfyllning och förslutning av tunnlar och bergrum, se avsnitt 18.2.2.

18.2.7 Gastransport/gaslösning

Gastransport i återfyllningen bedöms inte vara en viktig process. Om gas kan ta sig igenom bufferten, finns det tillräcklig transportkapacitet i berget för att vägen genom återfyllningen ska bli ointressant.

18.2.8 Svällning och kompression

Det är viktigt att återfyllnaden kan svälla för att inte konduktiva transportvägar i gränsoområdet mellan återfyllnad och berg ska bildas, se avsnitt 17.2.4 och 18.2.17.

Kompressionsegenskaperna är viktiga. De får inte vara sådana att buffertens svällning mot återfyllningen i deponeringshålen blir för stor. Kompressionsegenskaperna är en funktion av främst densiteten hos återfyllningen. Att bestämma kompressions- och svällningsegenskaperna och vilken densitet som kan uppnås vid inpackning av återfyllningen är en viktig del av studierna av olika återfyllningskoncept och material, se kapitel 18.2.2.

18.2.9 Mekanisk växelverkan återfyllning/närfältsberg

Återfyllningens permeabilitet styrs av dess materialsammansättning. Både återfyllningens och närzonsbergets mekaniska egenskaper styr hur stor återfyllningens stabiliserande förmåga är. Förståelsen för samspelet mellan berg och återfyllning har stor betydelse både vid projektering och platspecifik säkerhetsanalys i samband med platsundersökningarna.

Följande faktorer har betydelse för växelverkan mellan återfyllning och närfältsberg:

- Återfyllningens svälltryck och tyngd.
- Indirekta effekter av buffertens uppsvällning.
- Kryprorelser i berget runt tunneln.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Slutsatsen är oförändrad att svälltrycket mot taket är beroende av vilken densitet som kan uppnås i lerfasen vid packningen. Svårigheterna med packning mot taket gör det svårt att garantera ett visst svälltryck. Svälltrycket orsakas av bentoniten i utrymmet mellan bergkrosskornen, och är beroende inte bara av medeldensiteten hos bentoniten utan också av homogeniteten. En inhomogen blandning kan ge högt svälltryck i början på vissa ställen. Om svälltrycket sedan minskar på grund av homogenisering, genom att bentoniten sväller ut från porer med hög bentonitdensitet, är inte känt.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Allmänna aspekter på problemet med smällberg och stabiliteten hos deponeringshålens väggar ges i /18-7/, speciellt belyses betydelsen av ett litet mottryck från bufferten för att förhindra initiering och propagering av brott som kan leda till smällberg. Bakgrundsmaterial är teorin för spröda brott som tagits fram vid AECL:s berglaboratorium URL i Canada. Den allmänna slutsatsen, att ett litet mothåll kan räcka för att förbättra stabiliteten, gäller också andra typer av brott, till exempel utfall av bergkilar i tunnelperiferin.

Erfarenhet från Mine-by Test Tunnel i URL, Canada bekräftar betydelsen av små mothåll. Borttagande av golvmassor ledde till bergutfall /18-8/.

För långsamma kryprorelser som sker under lång tid och som innebär spänningsrelaxation av stora bergvolymerna har svälltryck av storleksordningen några hundra kPa ingen betydelse /18-9/. För att begränsa en sådan långsam krypstyrd konvergens måste tunnelåterfyllningen ha en kompressionsmodul som är flera storleksordningar större än vad man teoretiskt kan åstadkomma.

Program

Även om inte tunnelåterfyllningen kan begränsa den krypstyrda tunnelkonvergens, så gäller att återfyllningen påverkas. Ett program för att gränssätta konvergens av tunnlar och andra hålrum i förvarsberget har inletts med litteraturstudier och kommer att följas upp med tillämpningsberäkningar.

18.2.10 Termisk expansion

Betydelsen av denna process kommer att illustreras med enkla överslagberäkningar i SR-Can.

Den termiska expansionen hos strukturen och partikelfasen i återfyllningen är liten och påverkar endast marginellt. Däremot är den termiska expansionen hos vattnet stor och en snabb uppvärmning i en vattenmättad återfyllning där det expanderande vattnet inte hinner dränera undan kan åstadkomma stora tryck på en stel omgivning. I ett djupförvar är uppvärmningen så långsam i förhållande till den hydrauliska konduktiviteten att det expanderande vattnet hinner dränera.

18.2.11 Advektion

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Återfyllningen har en hydraulisk konduktivitet respektive diffusivitet som ligger i ett område där både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Vattenströmning i återfyllning studeras i full skala projektet Backfill and Plug Test i Äspö-laboratoriet, se avsnitt 18.2.2 och 18.2.6.

Program

Vattenströmning i återfyllning ska studeras dels i laboratoriet och dels i full skala i projektet Backfill and Plug Test, se avsnitt 18.2.2 och 18.2.6.

Betydelsen av advektion i återfyllningen för transport av radionuklider kommer att belysas i SR-Can.

18.2.12 Diffusion

Om återfyllnadsmaterial har låg hydraulisk konduktivitet kommer diffusion att vara den dominerande transportmekanismen för lösta specier.

18.2.13 Osmos

Begränsningar i befintlig packningsteknik, i kombination med mängden inblandad bentonit i återfyllningsmaterialet, leder till att densiteten hos montmorillonitfasen är avsevärt lägre än i bufferten. I grundtillståndet är därför montmorilloniten utsvälld till en volym som motsvarar den maximala utsvällningen vid en viss salthalt. Om salthalten överstiger denna kritiska gräns förändras porstrukturen och förändringarna leder till en kraftig ökning av den hydrauliska konduktiviteten, förlorad kontakt med berget samt ökad risk för kanalbildning vid höga vattenflöden. För de packningsresultat som i dag kan uppnås finns risk för avgörande försämring av återfyllningens funktion redan vid relativt låga salthalter i grundvattnet (några procent TDS).

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI framhåller betydelsen av processen inverkan av salt grundvatten på återfyllningens hydrauliska egenskaper. Även framtida förändringar av grundvattnets salthalt måste beaktas, se även Kasams synpunkter i avsnitt 18.2.21.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Principiellt fungerar återfyllningen på samma sätt som bufferten, se avsnitt 17.2.15. Salt grundvatten kommer därför att ha en större relativ inverkan på de fysikaliska egenskaperna i återfyllningen, eftersom densiteten hos andelen montmorillonit är lägre i återfyllningen.

Nuvarande packningsteknik av återfyllnadsmaterial i en deponeringstunnel ger inte tillräckligt hög montmorillonitdensitet för att klara säkerhetsmarginalerna vid havsvattenförhållanden.

Program

Se avsnitt 17.2.15. För återfyllnadsmaterial kommer utvecklingsarbetet att inriktas mot inplacementsteknik för att öka montmorillonitdensiteten, se avsnitt 18.1.6, och mot utprovning av olika lermaterial.

18.2.14 Jonbyte/sorption

Ett jonbyte från natrium till kalcium leder till likartade effekter som hög salthalt i grundvattnet, se avsnitt 17.2.16, i ett återfyllningsmaterial med låg halt av svällande lera, det vill säga porgeometrin förändras och återfyllningen riskerar att förlora sina svällande och tätande egenskaper.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI framhåller att SKB bör värdera vad salta grundvatten betyder för förvaret.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Se avsnitt 17.2.16.

Program

Se avsnitt 17.2.16.

18.2.15 Montmorillonitomvandling

Det som sägs om montmorillonitomvandling i bufferten gäller i stort sett också för återfyllnaden, se avsnitt 17.2.17. Randvillkoren har dock vissa skillnader. Temperaturen i återfyllnaden är lägre och tillgången på järn är mindre vilket skulle ge långsammare omvandling. Å andra sidan kan densiteten vara lägre och mängden cement kan vara högre vilket kan ge snabbare omvandling.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam anser det bör sättas en gräns för hur mycket kalium som bergkross får innehålla.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Se avsnitt 17.2.17.

Program

Se avsnitt 17.2.17.

18.2.16 Lösning/fällning föroreningar

Naturliga föroreningar i återfyllnadsmaterialet har ingen betydelse för dess långsiktiga funktion. Däremot kan konstruktionsmaterial och kvarglömda material ge påverkan på förvaret, särskilt de som finns kvar i större mängder. Det finns två sammanställningar över de material som möjligen blir kvarlämnade i förvaret /18-10, 18-11/.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Egenskaperna hos låg-pH-cement och dess effekter i samband med ett slutförvar granskades vid ett internationellt möte som organiserades av SKB. Vid mötet framkom behovet av ytterligare utveckling av material med lågt pH för användning vid slutförvaring av kärnavfall. Material vars lakvatten har pH lägre än 11 bedöms ha försumbara effekter på bufferten och återfyllnaden.

Program

Injektionsmedel med relativt sett låga pH-värden utvecklas och testas i ett projekt tillsammans med Posiva, se kapitel 10.

Inom ramen för SR-Can kommer betydelsen av konstruktions- och kvarglömda material att analyseras.

18.2.17 Kolloidfrigörelse/erosion

I återfyllningen är risken för erosion störst om en spalt finns i taket mot berget där densiteten hos återfyllningen blir lägst. Detta kan inträffa genom att en spalt finns från början därför att packningen är otillräcklig eller genom att kanalbildning uppstår i inpackningsskedet på grund av högt vattentryck och stort vatteninflöde. Då bevätningen utbildats helt strävar återfyllningen att expandera och konsolidera gränssonen.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Vid den låga densitet som återfyllningen sannolikt kommer att få vid tunneltaket finns en risk att expansionsförmågan hos återfyllningen enligt förvarets specifikation inte räcker till för att upprätthålla kontakten med tak och övre väggdelar i tunnlar, varvid risken för borttvättning och betydande heterogenitet hos återfyllningen kvarstår. Detta kan undvikas genom att återfylla med block med högre bentonithalt nära tunneltaket.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Fenomenet piping-erosion i återfyllningen kan naturligt uppträda i de båda Äspöprojekten Backfill and Plug Test och Prototypförvaret. Vid brytning och urgrävning av dessa försök kan man förmodligen se om fenomenet uppstått och dess konsekvenser. Dessutom appliceras en konstgjord vattentrycksgradient under flödestesterna i Backfill and Plug Test. Resultaten kommer att visa om piping uppstått.

Program

Piping och erosion för olika återfyllningsmaterial kommer även att studeras inom projektet Återfyllning och förslutning av tunnlar och bergum.

18.2.18 Strålinducerad montmorillonitombildning

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och därför även försumbar i återfyllningen.

18.2.19 Radiolys av porvatten

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och därför även försumbar i återfyllningen.

18.2.20 Mikrobiella processer

I återfyllningsmaterialet ökar möjligheterna till bakteriell aktivitet med minskande densitet och ökande vattentillgång. Många bakterier konsumerar syre vid sin förbränning av organiskt material, metan, järn(II) och svavel.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Slutsatsen är oförändrad att en bakteriell aktivitet i återfyllningen kan vara fördelaktig eftersom den kommer att ge ett betydande bidrag till syrereduktionen där.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Se avsnitt 17.2.22.

18.2.21 Radionuklidtransport – advektion

Återfyllningen har en hydraulisk konduktivitet respektive diffusivitet som ligger i ett område där både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kasam anser att SKB bör göra funktionsanalyser av systemet buffert-återfyllning-geosfär för att belysa för- och nackdelar med olika typer av återfyllning (naturliga leror, blandningar av bergkross och lera, samt enbart bergkross med en storleksfördelning som bäst står emot buffertens expansion). Funktionsanalysen bör även omfatta utvecklingen på lång sikt i miljöer med olika salthalt.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Inom SR-Can kommer en ingående studie av radionuklidtransport i återfyllningen under olika förutsättningar och antaganden att genomföras.

18.2.22 Radionuklidtransport – diffusion

Diffusion av radionuklider i återfyllningen är av underordnad betydelse för förvarets säkerhet.

18.2.23 Radionuklidtransport – sorption

Sorption av radionuklider i återfyllningen har mycket begränsad betydelse för förvarets funktion. I SR 97 antogs att fördelningskoefficienterna stod i proportion till innehållet av bentonit och bergkross.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI saknar motivering till SKB:s slutsats att bestämningen av K_d -värden inte kräver ytterligare insatser.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ingen ny kunskap har tillkommit.

Program

Området anses färdigbehandlat.

18.2.24 Radionuklidtransport – speciering av radionuklider

Specieringen av radionukliderna har betydelse för sorptionen och diffusionen i återfyllnaden. Den påverkas av vilken speciering nukliden hade vid randen till återfyllanden, det vill säga inuti bufferten, men också av de kemiska förhållandena i återfyllanden.

Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 15.2.14. I SR-Can genomförs samma typ av specieringsberäkningar för bland annat buffertmiljön som i SR 97.

18.3 Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet

De probabilistiska riskberäkningarna i SR 97 (och tidigare säkerhetsanalyser) gjordes med programpaketet Proper. Proper är en samling beräkningsprogram som förutom rutiner för att generera probabilistiska indata och rutiner för att hantera kommunikation mellan olika delar av koden består av ett antal submoduler för att beräkna radionuklidtransport i olika delar av förvaret. Den version av Proper som använts är skriven i Fortran 77 och har körts på en Unix-plattform. I SR 97 beräknades radionuklidtransport i närområdet med Propermodulen Comp23. Den konceptuella modell som implementerats i Comp23 innefattar processer som bränsleupplösning, utfällning och lösning av löslighetsbegränsade radionuklider, diffusion genom en specificerad skada i kopparhöljet, diffusion och sorption i bufferten och återfyllningen, transport ut till omgivande geosfär samt kedjesönderfall.

Radionuklidtransport i kapselns inre förenklades vid modelleringen i SR 97 på följande sätt: Efter att en bestämd karenstid förflutit sedan en skada på kapselns kopparhölje uppkommit antas hela kapselns inre tomrum, cirka 1 m³, vara fyllt med vatten. Karenstidens storlek bedöms med ledning av storleken på skadan i kopparhöljet och den påföljande vattenomsättningen och korrosionen. Allt vatten i kapseln antogs efter karenstiden vara tillgängligt för bränsleupplösning, det vill säga stå i direkt kontakt med allt bränsle utan att hindras av Zirkaloykapsling eller andra strukturer. Vattnet antogs vara ständigt omrört, det vill säga inga koncentrationsskillnader råder mellan olika delar i kapselns inre. Bränsleupplösning, segregerade nuklider samt radionuklider i bränslets strukturdelar antas vara tillgängliga för vattenlösning omedelbart efter karenstidens slut. Sorption av radionuklider till kapselns inre delar försummas.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI ifrågasätter huruvida det är möjligt att få en förbättrad förståelse av transportfenomenen genom att använda en enkel analytisk modell.

Enligt SKI framgår det inte hur SKB förbättrat beskrivningen av de i Comp23 ingående transport- och reaktionsprocesserna.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Som komplement till och för utvärdering av den närområdeskod som användes i SR 97, Comp23, har en alternativ kod, Compulink, tagits fram. Denna alternativa kod är baserad på samma konceptuella modell som Comp23 och inkluderar samma processer; de två koderna

Program

Utvecklingen av Simulink-Matlab-implementationen av Compulink kommer att fortsätta under den närmaste tiden, bland annat måste användargränssnittet förbättras så att urval av indata förenklas. En del av detta arbete kommer att bedrivas i samarbete med utvecklingsprojektet av en ny Matlab-Simulink-baserad kod för biosfärssimuleringar. Programutvecklingen av Comp23 kommer däremot inte att fortsätta med samma hastighet som tidigare under nästa treårsperiod. Anledningen till detta är inte att utvecklingsresurser flyttas från Comp23 till Compulink utan att utvecklingsbehovet inte är lika stort som tidigare. Det finns dock områden där förfiningar och implementationer av modeller är möjliga. Det kan exempelvis gälla modeller för bränsleupplösning där en nyutveckling av modellerna sker.

19 Geosfär

19.1 Initialtillstånd för geosfären

Djupförvaret ska förläggas i kristallint berg med granitisk sammansättning. Säkerhetsanalysen tar sin utgångspunkt i situationen som råder då förvaret just byggts och förslutits. För geosfären utgör denna situation en störning av det tillstånd som rådde innan förvaret byggdes.

Framför allt påverkas grundvattenflöde och grundvattentryck av dräneringen. Även grundvattenkemin kan påverkas av grundvattenströmningen, om vatten med avvikande sammansättning strömmar mot förvaret. De kemiska förhållandena påverkas också av att förvaret står öppet och olika material tillförs. Hur stor påverkan blir beror av flera faktorer, bland annat hur förvaret byggs och hur lång tid det dräneras.

Resultatet av platsundersökningen är det viktigaste underlaget för att bestämma geosfärens tillstånd efter förslutning (initialtillståndet). Programmet för detta har presenterats i särskilda rapporter.

19.2 Processer i geosfären

19.2.1 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 gasströmning 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 och i partier där vattnet är stillastående.

Vid advektion följer vattenlösta ämnen med det strömmande vattnet. Processen leder bland annat till att olika vattentyper från olika partier av geosfären blandas. Reaktioner sker mellan grundvattnet och sprickytor, och dessa ger upphov till lösning och fällning av sprickmineral. Dessutom sker mycket långsamma reaktioner mellan grundvatten och mineral i bergmatrisen. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från förvars-konstruktionen, kolloidbildning och gasbildning. Vid en glaciation kan också metanisbildning och saltutfrysning förekomma.

Vid ett eventuellt utsläpp av radionuklider kan dessa transporteras med det strömmande grundvattnet, advektion. Även 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 för de olika processerna i geosfären.

19.2.2 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 redovisas synpunkten att värme transporteras i geosfären genom ledning i det intakta berget, och att de modeller och beräkningsmetoder som finns är tillräckligt verifierade för att man ska kunna uppfylla designkriteriet.

Myndigheterna anser att den maximala temperaturen närmast kapslarna underskattas i storskaliga modeller med utbredda värmelaster, och att inverkan av förenklade beräkningsantaganden bör belysas bättre. De THMC-modelleringar som görs i fortsättningen bör uppdateras med de senaste temperaturberäkningarna.

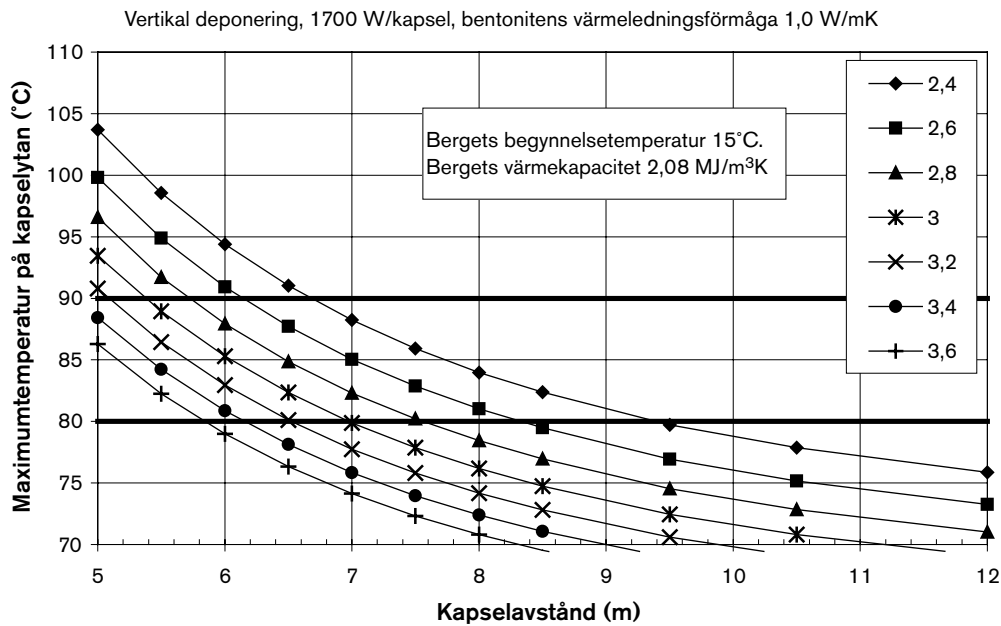
Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Problemet med temperaturutvecklingen i berget har sedan Fud 2001 behandlats ingående, framför allt med tanke på den maximala temperaturen närmast kapslarna /19-1/. Studien ger samband mellan kapselns maxtemperatur, bergets värmetransportegenskaper, kapseffekten vid deponering, deponeringsgeometrin och förhållandena i bufferten. Den enskilda kapselns geometri beaktas så att närfältets temperaturutveckling, framför allt vid den hetaste delen vid kapselns höjdcentrum, blir korrekt beräknad. Figur 19-1 visar ett exempel. I beräkningarna, som utförs med olika kombinationer av analytiska och numeriska metoder, beaktas värme-spridningsproblemet i alla skalor. Studien ger också indikationer på hur känslig den beräknade maximumtemperaturen på kapselytan är för fel i indata, bland annat för fel i angivelsen av bergets värmekonduktivitet och värmekapacitet. Inverkan av de förenklade antaganden som i allmänhet görs, till exempel approximationen att bortse från värmekonduktivitetens temperaturberoende och inverkan av tunnelåterfyllningens annorlunda värmetransportegenskaper, belyses och kvantifieras.

Olika laboriebaserade metoder för prediktering av värmekonduktiviteten hos berget närmast ett borrhål har jämförts med en storskalig metod för direktmätning i borrhål, termisk responstest /19-2/. Den termiska responstesten ger cirka 25 procents överskattning av värmekonduktiviteten jämfört med det resultat man får om man utgår från de laboriebestämda egenskaperna hos de ingående bergarterna och beräknar den effektiva värmekonduktiviteten med hänsyn till den karterade bergartsfördelningen. Tolkningen är att fullskalemetoden behöver utvecklas så att man kan kompensera för effekter av vattenrörelse i borrhålet under mätningen.

En systematisk utvärdering av några metoder för laboriebestämmning av värmekonduktivitet och värmekapacitet har genomförts /19-3/. Metoderna ger i genomsnitt skillnader i storleksordningen någon procent för ett antal mätta prover, medan variationen mellan individuella prover kan vara betydligt större.

En strategi för hur en beskrivande termisk modell bör tas fram under platsundersökningsskedet har utarbetats /19-4/. Basen för den termiska modellen är de geologiska och hydrogeologiska platsmodellerna och direkta mätningar av termiska och geofysiska egenskaper.



Figur 19-1. Maximumtemperatur på kapselytan för olika antaganden om bergets värmeledningsförmåga. De horisontella linjerna är tröskelvärden som svarar mot olika marginaler till kriterietemperaturen 100 °C.

Skalberoendet hos effekterna av bergartsfördelning har analyserats som ett led i utvecklingen av en termisk modell för Äspölaboratoriet /19-5/. Vidare har värmekonduktiviteter, uppmätta eller beräknade från mineralogisk sammansättning, analyserats statistiskt. Därutöver har ett samband mellan densitet och värmekonduktivitet tagits fram för aktuella bergarter i Äspölaboratoriet. Utifrån detta har geofysiska densitetsloggningar på försök utnyttjats för att analysera fördelning och skalberoende av bergmassans termiska egenskaper i Äspö.

Program

De analyser som nu gjorts för att bestämma avståndet mellan kapslarna utökas och samordnas med analyser som görs för systemet kapsel/buffert (bland annat för att komma fram till en relevant hantering av luftspalter). Dessutom kommer beräkningarna att utvidgas så att man kan beräkna effekterna av att förskjuta enstaka kapselhålspositioner med bibehållet, eller bara marginellt utökat, genomsnittligt kapselavstånd. Effekterna på bestämningen av avståndet mellan kapslarna av variationer i bergets termiska egenskaper, i olika skalor, kommer att undersökas numeriskt och analytiskt.

Arbetet med att utveckla, kalibrera och verifiera metoder för bestämning av termiska egenskaper fortsätter, liksom arbetet med att omsätta resultatet till termiska modeller i olika skalor.

De temperaturmätningar i berget som görs i Prototypförvaret och inom Återtagningsförsöket i Äspölaboratoriet utvärderas i syfte att bestämma värmetransportegenskaper genom bakåträkning.

En termisk modell upprättas för Prototypförvaret i Äspölaboratoriet med användande av de tekniker som föreslagits för mätning och uppskattning av de olika bergartkomponenternas termiska egenskaper och fördelning. Genom bakåträkning utgående från resultaten från Prototypförvaret kommer man att kunna pröva och värdera användbarheten och tillförlitligheten hos den termiska modellen.

Resultaten från arbetena används för att vidareutveckla strategin för den beskrivande termiska platsmodellen.

Prototypförvaret och Återtagningsförsöket i Äspölaboratoriet modelleras med THMC-koder. Syftet med dessa beräkningar är att pröva och verifiera modeller som beskriver samtidig transport av värme, vatten, ånga, gas och lösta salter i den delvis omättade bufferten. Värmetransportförhållandena i geosfären, det vill säga i närfältsberget, är inte avgörande för dessa beräkningar, men behöver inkluderas och stämmas av mot data från termiska geosfärmodeller.

19.2.3 Grundvattenströmning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud-program 2001 konstaterades främst att modellutvecklingen med hjälp av beräkningsverktygen (koderna) Connectflow och DarcyTools skulle fortsätta, samt att modellstudier av in- och utströmningsområden hade hög prioritet.

Kasam konstaterade i sin granskning av programmet att modellering av grundvattenströmning i ett regionalt perspektiv samt modellering av grundvattenbildningens storlek på olika djup var viktiga uppgifter.

SKI konstaterade i sin bedömning att studier av in- och utströmningsområden är viktiga, men att även utvecklandet av en generell hydrogeologisk processförståelse rörande dessa frågor är viktig. Vidare påpekade SKI att användandet av en stokastisk kontinuumansats för modellering i plattskala inte har motiverats tillräckligt väl.

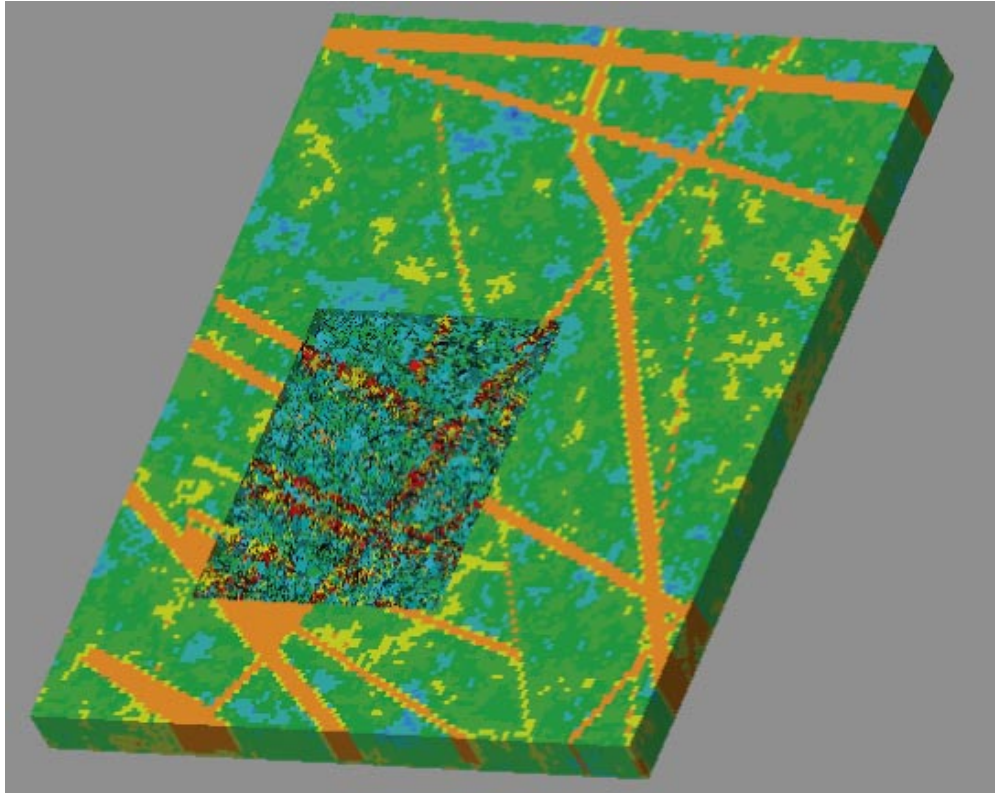
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Den grundläggande kunskapen om grundvattenströmning är god. Den utveckling som pågår är snarare kopplad till utveckling av beräkningsverktyg (numeriska modeller). Vissa principstudier har dock utförts för att utöka kunskapen om specifika frågeställningar såsom ytnära grundvattenströmning samt storskalig grundvattenströmning för att förstå problematiken kring in- och utströmningsområden.

De två beräkningsverktygen Connectflow /19-6 till 19-8/ och DarcyTools /19-9 till 19-11/ har fortsatt att utvecklas under den senaste treårsperioden. Connectflow kan i dag hantera nestlade modeller (modeller där olika skalor är inneslutna i varandra). Man kan till exempel ha en kontinuumbeskrivning av förvaret med deponeringstunnlar och deponeringshål inneslutet i en diskret nätverksmodell i lokal skala, vilken i sin tur är inneslutet i en kontinuummodell i regional skala. Även transient densitetsdriven strömning kan hanteras (densitetsdriven strömning enbart i kontinuummodellen). Dessutom har funktionaliteten för att inkorporera diskreta zoner utvecklats, en så kallad implicit-fracture-zone-funktionalitet. Olika gränssnitt mot beräkningsverktyget RVS har utvecklats, liksom nya verktyg för postprocessering av resultat (till exempel rutiner för Tecplot).

Utvecklingen av koden Connectflow, där modellering av grundvattenströmning genom enskilda deponeringshål och tunnlar i ett förslutet förvar är möjlig, innebär att detaljerad information kan produceras för vidare beräkningar av radionuklidtransport. Detta beskrivs ytterligare i avsnitt 19.2.12. Connectflow har även utvecklats för att kunna beskriva grundvattenströmning kring ett öppet förvar, det vill säga för tunnlar vid atmosfärstryck /19-12/. De viktiga frågorna att belysa vid denna typ av analys är ”up-coning” av saltvatten till förvarsdjup, inflöde av vatten till tunnelsystemet vid öppet förvar, samt tid för återmättnad av förvaret efter förslutning av förvaret. Andra frågor av intresse vid ett öppet förvar kan vara till exempel påverkan på ytnära förhållanden såsom vattennivåer i brunnar.

Även koden DarcyTools har genomgått en betydande utveckling under de tre senaste åren. DarcyTools är i grunden en kontinuummodell, men använder sig av en speciell teknik för att generera kontinuumfälten. Ett diskret spricknätverk skapas som sedan omvandlas till ett kontinuumfält genom en volymbaserad viktning av permeabilitetsegenskaper för enskilda strukturer. För transport av salt och spårämnen har en ”multi-rate” matrisdiffusionsmodell



Figur 19-2. *Connectflow-representation av en diskret spricknätverksmodell i en kontinuummodell.*

inkorporerats i DarcyTools. Denna teknik gör det bland annat möjligt att beskriva den historiska saltutvecklingen i Östersjön på ett trovärdigt sätt, det vill säga med realistiska parametrar för till exempel bergporositeten. DarcyTools har även försetts med en ny numerisk ekvationslösare som gör det möjligt att simulera modeller med upp till flera miljoner sprickor och element.

Connectflow och DarcyTools har båda använts vid de pågående platsmodelleringsprojekten för Forsmark och Oskarshamn /19-13, 19-14/. Dessa studier har inneburit att modellerna testats mot varandra, samt att viss funktionalitet som gränssnitt utvecklats. Connectflow har även använts för att göra om den glaciationssimulering som togs fram inom SR 97 /19-15/.

Ny processkunskap om grundvattenströmning har uppnåtts i de superregionala simuleringsstudier som utförts för Norduppland /19-16/ och östra Småland /19-17/. Dessa studier visar att lokala strömningsmönster (flödesceller), orsakade av förhållandet mellan lokala och regionala gradienter, dominerar grundvattenströmningen ner till typiska förvarsdjup. Eftersom den lokala topografin är starkt styrande för de lokala gradienterna är det av yttersta vikt att ha en god databas och numerisk upplösning av topografin. Vidare visar dessa studier att förekomsten av salt grundvatten mot djupet kan verka som ett golv för grundvattenflödet och därmed ytterligare förstärka effekterna av de lokala flödescellerna.

I en fortsättning till den superregionala modelleringen av Norduppland har även en mer detaljerad studie gjorts över grundvattenströmning nära markytan, det så kallade geosfärsbiosfärsgränsskiktet /19-18/. I denna studie har de kvartära avlagringarna modellerats med hög upplösning samtidigt som årstidsvariationer i grundvatteninfiltration inkluderats. Resultaten visar att även om utströmningsområden för grundvatten finns över stora delar av modellens övre yta, så sker utströmning av vattenpartiklar från förvarsdjup i väldefinierade lågpunkter. Sådana lågpunkter är typiskt sjöar, under havet, samt andra lågpunkter i terrängen. Denna bild av utströmning från förvarsdjup påverkas endast marginellt av att inte explicit inkludera de kvartära avlagringarna. Vidare visas att även om effekten av årstidsvariationer i grundvatteninfiltration har stor betydelse för vattenströmning i de kvartära avlagringarna så är effekten på

strömningsmönster för partiklar släppta på förvarsdjup försumbar. Slutligen visas också att strömningsvägarnas längd i de kvartära avlagringarna är förhållandevis korta (cirka en faktor tio längre än de kvartära avlagringarnas mäktighet). De längsta flödesvägarna är företrädesvis under sjöbottnar; ju tätare bottensediment, desto längre tenderar dessa vägar att bli. Denna studie indikerar att den modelleringsstrategi som vanligtvis används för att beskriva det djupa grundvattnet är tillfyllest för att med tillräcklig noggrannhet beskriva utströmningsmönster för radionuklider från förvarsdjup. För detta syfte behövs alltså inte kopplade biosfärs-geosfärsmodeller.

Program

Under den kommande treårsperioden kommer de två beräkningsverktygen för grundvattenströmning att användas och testas inom platsmodelleringsprojekten och inom säkerhetsanalysen. Dessutom planeras riktade insatser för att belysa enskilda frågeställningar. En sådan frågeställning är att förstå hur vattensammansättningen, särskilt salthalten, i grundvattnet har utvecklats och kommer att utvecklas i framtiden. I ett projekt kopplat till Äspölaboratoriet, Äspömodeller 2005, sammanställs alla nya tillgängliga hydrogeologiska och geokemiska data som tillkommit sedan den senaste officiella modellversion för Äspö /19-19/. Dessa data kommer att användas för att med DarcyTools försöka ge en sammanhängande bild av hur vattenkemin (saltfördelningen) utvecklats och kommer att utvecklas i ett 10 000-årsperspektiv. En hypotes i arbetet är att diffusion av salt in i bergmatrisen är en viktig process att beakta för att kunna förstå den historiska saltutvecklingen. Resultaten från denna studie förväntas bli direkt tillämpliga i platsmodelleringsprojekten.

Ytterligare resurser kommer även att läggas på en förbättrad förståelse och utveckling av modelleringsverktyg för den ytnära hydrogeologin. Två parallella spår kommer att följas i detta skede: en förenklad variant och en kopplad ansats. I den förenklade varianten antar man att modellerna för det djupa grundvattnet ger tillräcklig information och noggrannhet för att prediktera radionuklidens utsläppspunkter i biosfären, se diskussion ovan. I detta fall behövs endast en modell för ytvattenhydrologin som ger relevant information främst kring vilken utspädning som kan förväntas ske med ytvatten. Dock gäller att dessa processer måste konceptualiseras och implementeras i modellerna på ett korrekt sätt. Detta förenklade angreppssätt bör jämföras med en kopplad strategi där både den djupa och ytnära grundvattenströmningen samt ytvattenhydrologin beskrivs i samma modell. En öppen fråga är hur detaljerat biosfären bör beskrivas i dessa modeller, det vill säga kan biosfärsprocesserna beskrivas i en separat modell, eller bör även dessa inkorporeras i den kopplade hydrologiska modellen för grundvatten-ytvatten. Denna typ av studier förväntas genomföras som en integrerad del av platsmodelleringsarbetet.

Viss modellutveckling förväntas ske under de kommande åren, till exempel utveckling av randvillkorsoptioner för simulering av ett öppet förvar så att effekten av en grundvattensänkning i de ytnära jordlagren kan studeras. Generellt gäller att modellverktygen bör testas mer rigoröst för applikationer med öppet förvar då denna typ av studier inte genomförts tidigare i någon större omfattning.

Utvecklingen av Connectflow bedrivs effektivt via multilateralt samarbete i Connect Club. Förhoppningen är att denna verksamhet ska fortsätta under den kommande treårsperioden. Även ett doktorandprojekt kommer att initieras där mer grundläggande frågeställningar kring processer som till exempel densitetsdriven strömning och tvåfasflöde i diskreta spricknätverk kan undersökas.

DarcyTools utvecklas genom interna SKB-insatser. Under kommande period förväntas version 2.1, som primärt är utvecklad för platsanalysens behov, att utvecklas vidare till en version som klarar de specifika behov som ställs inom säkerhetsanalysen.

Ett ytterligare modellverktyg som fortsättningsvis utvecklas är kanalnätverksmodellen Chan3D /19-20/. Även om den inte används i produktionssyfte inom platsmodellering och säkerhetsanalys, tjänar denna modell ett viktigt syfte för att belysa en del specifika frågeställningar. En sådan frågeställning är radionuklidtransport i transienta flödesfält. Denna frågeställning kan hanteras med Chan3D då flöde och transport simuleras kopplat i samma modell /19-21/. Effekterna av transienta flödesfält, till exempel på grund av strandlinjeförskjutning, kommer att studeras ytterligare. Detta beskrivs mer detaljerat i avsnitt 19.2.12.

19.2.4 Gasströmning/gaslösning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i Fud 2001 eller vid dess granskning.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

En sammanställning av kunskaperna om processerna gasströmning och transport i gasfas har gjorts som ett underlag till EU-projektet Retrock /19-22/, och man konstaterar därvid att det inte finns något större behov av ytterligare forskning för den tänkta applikationen. Vissa öppna frågor konstateras dock, nämligen att det är oklart om de genererade gasmängderna i ett djupförvar för använt kärnbränsle är tillräckligt stora för att utgöra ett eventuellt problem. Om så är fallet, det vill säga att en fri gasfas kan utvecklas, bör denna fråga utredas ytterligare. Specifikt behövs bättre och framför allt experimentellt verifierade modeller för bubbelflöde, samt metoder för att ta fram representativa K-S-P-funktioner (konduktivitet-mättnad-tryck).

Program

En ytterligare fråga som bör utredas är om gasströmning (eller snarare tvåfasflöde med faserna vatten och gas) bör inkorporeras i analysen av återmättnadsprocessen i ett tidigare öppet förvar. Den tänkta sekvensen består av ett luftfyllt förvar vid atmosfärstryck som packas igen med återfyllnadsmaterial, och där pumpning sedan upphör så att förvaret sakta återfylls med vatten. Det rör sig alltså om ett system som går från en fullständig gasfas till en fullständig vattenfas. En öppen fråga är om denna situation kan approximeras med enbart vattenströmning, det vill säga att gasfasen i förvaret försummas då vattentrycket stiger och förvaret återmätts. En trolig begränsning i en tvåfasbeskrivning är dock att parametreringen av modellen kan vara behäftad med stora osäkerheter.

19.2.5 Rörelser i intakt berg

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 redogjordes för planerna med platsbeskrivande bergmekaniska modeller. Behov av insatser när det gäller rörelse i intakt berg skulle identifieras och belysas inom ramen för detta arbete.

Myndigheterna har inte lämnat några kommentarer till denna process.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Inom ramen för utveckling av strategi för platsbeskrivande modell /19-23/ hanterades de grundläggande frågorna om karakterisering av bergets mekaniska egenskaper, samt relevanta skalor för detta och beskrivning och/eller modellering av spänningstillståndet. En genomgripande översyn av metoder för spänningsmätningar och metoder för utvärdering av spänningsmätningar har gjorts med tanke på arbetet med spänningsbeskrivningen i platsmodellerna /19-24 till 19-28/.

Strategin för att utveckla beskrivande platsmodeller testades först på data från Äspö /19-29/, tillämpades sedan på Laxemar /19-30/ och för de så kallade nollversionsrapporterna för platsundersökningarna /19-31, 19-32/. Strategin tillämpas även i den fortsatta platsmodelleringen.

Spänningsvägarnas betydelse för bland annat belastning och rörelser i det intakta berget har beskrivits systematiskt i en översiktstudie och jämförts med kriterier för olika typer av brott som kan utbildas i anslutning till förvarets hålrum /19-33/. Studien visar speciellt på att små mothåll, till exempel från tunnelåterfyllningen, kan vara av betydelse för att förhindra uppkomst och utveckling av spröda brott.

I det pågående Apse-försöket i Äspölaboratoriet /19-34/ har detaljerad karakterisering och modellering av spänningar och deformationer utförts. Resultat ställs mot mätdata.

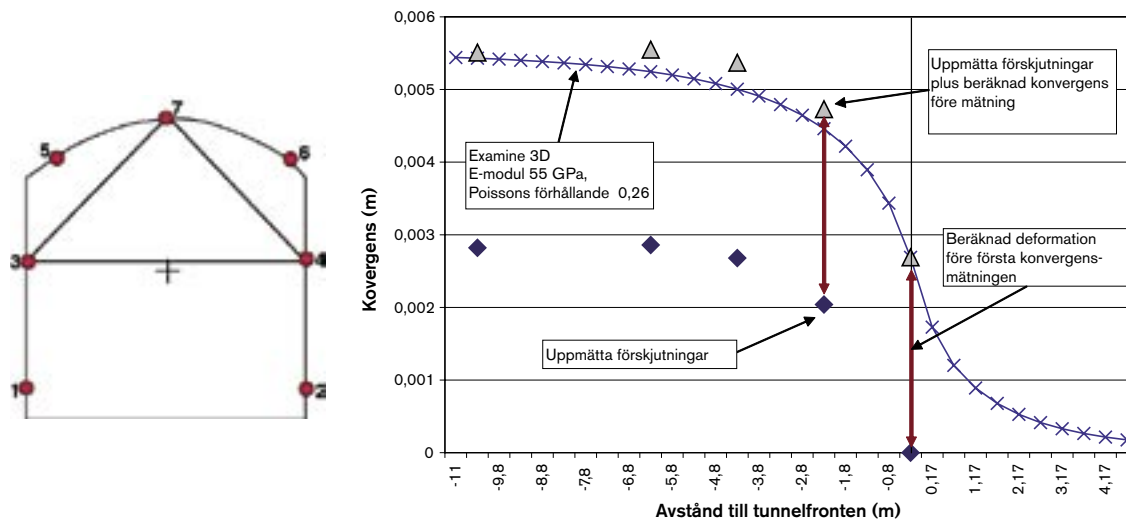
I samband med utsprängningen av Apse-tunneln utfördes detaljerade konvergensmätningar i nästan sprickfritt berg. En omgång passningsräkningar av konvergensrörelserna har genomförts /19-35/. Om man i den numeriska modellen antar att bergets elasticitetsegenskaper är nära de som uppmätts för intakt berg, bekräftar passningsräkningarna de prognostiserade spänningarna: $\sigma_1 = 30$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa, där σ_1 är horisontell och vinkelrät mot tunneln. Figur 19-3 visar att överensstämmelsen är god och verifierar därmed också att responsen på bergguttaget är i huvudsak elastisk, vilket är förväntat med tanke på den låga spricktätheten i mätsektionen.

Program

Apse-försöket genomförs under 2004. Under 2005 görs en fullständig utvärdering.

Strategin för platsbeskrivande bergmekanisk modellering tillämpas och utvecklas inom ramen för platsundersökningarna (projekt Djupförvar).

Fördjupad analys i anslutning till utvärderingen av Apse-försöket angående kalibrering av strategin för platsbeskrivande bergmekanisk modellering, främst utifrån jämförelse mellan prognostiserade egenskaper och utfall av experimentet.



Figur 19-3. Konvergensmätning av Apse-tunneln. Mätubbarna installerades på ett avstånd av mellan 0,3 meter och 0,5 meter från tunneln. Till vänster visas principen för konvergensmätning och mätubbarnas placering i mätsektionen. Till höger visas hur avståndet mellan dubbarna 3 och 4 minskar efterhand som avståndet till tunneln växer (Uppmätta förskjutningar). De beräknade deformationerna, "Examine3D", gäller ett fall där spänningsfält och elastiska egenskaper bestäms genom passningsräkning för att ge bästa möjliga totala överensstämmelse med mätvärdena, korrigerade för att inkludera också beräknad konvergensrörelse innan första mätningen.

19.2.6 Termisk rörelse

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 redovisades översiktliga planer för framtagning av beskrivande bergmekaniska modeller. Risken för kapselskador på grund av termomekanisk belastning hanterades i Fud 2001 under processen reaktivering och kan i praktiken sättas till noll, förutsatt att man kan räkna med att inga kapselhål kommer att skäras av sprickor med en utsträckning som är större än 700 meter i stupningsriktningen /19-36/.

Myndigheterna saknar en referens i Fud-program 2001 till påståendet att processen termomekanisk belastning inte ger kapselskador. SKI anser att detta återstår att visa.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Inom Decovalex-projektet har bergets termohydromekaniska respons på tunneluttag och uppvärmning analyserats med flera olika verktyg, bland annat med den kommersiellt tillgängliga koden Abaqus. Utvärderingen och rapportering av SKB-arbetet, det vill säga simulering av Febex-experimentet, pågår.

Program

Apse-försöket fortsätter med efterhand uppdaterade analyser av de termiskt genererade rörelserna och spänningsförändringarna.

Inom ramen för projekteringen (steg D2 i SKB:s planering) görs termomekaniska numeriska analyser med användning av platsdata. Möjligen görs först generella termomekaniska 3DEC-analyser som kommer att fungera som referensfall, och där berget antas ha de ekvivalenta kontinuumegenskaper som kommit fram i de första versionerna av platsmodellerna. Övriga indata, det vill säga termiska laster, kapselavstånd med mera bestäms utifrån de senaste termiska dimensioneringsanalyserna.

19.2.7 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 fastslogs att riskerna med inducerade sprickrörelser överskattats i SR 97 på grund av de överdrivna säkerhetsmarginaler som tillämpats i de numeriska analyserna. Dessutom redogjordes i Fud 2001 för planer på att utvidga det numeriska underlaget för bedömning av möjliga seismiskt inducerade sprickrörelser genom att definiera och genomföra ett program med dynamiska beräkningar.

Myndigheterna anser att SKB:s bedömning att den uppskattade risken i tektonikscenariot överskattas troligen är riktig (eftersom bedömningen utgår från friktionsfria sprickor) och att det är bra att dokumentation av jordskalvseffekter på undermarkskonstruktioner pågår.

Myndigheterna anser att det är angeläget att SKB redovisar de samlade erfarenheter som finns för att belägga att eventuell ny sprickbildning inte påverkar en tektonisk lins, som den i Forsmark, vid en framtida glaciation och att möjligheten att framtida förkastningsrörelser sker längs nya linjer beaktas

Myndigheterna anser att SKB:s planerade forskningsaktiviteter inom området sprickbildning och reaktivering förefaller ge svar på flertalet frågor.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Spricksystemets roll för deformationer i närfältet vid tunneluttag och borrning av deponeringshål har behandlats i en 3DEC-studie /19-37/. Spricksystemet, med sprickor av storleksordningen fem till 15 meter var baserat på en statistisk DFN-modell av TBM-tunneln i Äspölaboratoriet.

Huvudslutsatsen är att spricksystem av den typ som antogs i modellen inte spelar någon avgörande roll rent mekaniskt, åtminstone inte när det gäller utbildning av brott i intakta bergblock eller det allmänna deformationsmönstret. Även om systemets sprickor har låg hållfasthet blir sprickrörelserna små överallt utom alldeles i närheten av tunnlar och deponeringshål. Spänningsomfördelningen som följde med rörelserna i spricksystemet blev liten och medförde inte att någon del av det modellerade intakta berget kom i närheten av brottgränsen. När det gäller risk för smällberg är spänningarna och spänningarnas riktning i förhållande till tunnlar och hålrum viktigare än detaljer i sprickgeometrin. Man kan notera att den allmänna slutsatsen att deformationsmönstret huvudsakligen var elastiskt stämmer väl med passningsräkningarna som gjordes i samband med konvergensmätningarna i Apse-försöket /19-35/.

Deformationer vid uttag av Zedex-tunneln och TBM-tunneln i Äspölaboratoriet beräknades med koderna 3DEC och Flac3D /19-38/. Studien gjordes av NGI i samarbete med SKB. De beräknade resultaten jämfördes med resultaten från mätningar med extensometrar under byggskedet. En huvudslutsats var att spricksystemets roll kan var mindre än man tidigare antagit. Kvalitativt stämmer detta med resultat av SKB-studien /19-37/ och med resultatet från Apse-försöket /19-35/.

I programmet för utveckling av beskrivande bergmekaniska modeller /19-23/ har det generella problemet med översättning av statistisk representation av sprickgeometri och sprickors mekaniska egenskaper till ekvivalent kontinuumrepresentation behandlats /19-39, 19-40/.

Seismiskt inducerade skjuvrörelser hos sprickor har analyserats dynamiskt med koderna Wave och Flac3D /19-41/. I SR 97 analyserades motsvarande problem med en statisk, det vill säga ickedynamisk beräkningsmetod och med statistiskt genererade skalv som inducerade rörelser i statistiskt genererade platsspecifika sprickpopulationer, innehållande sprickor av olika utsträckning och orientering. De dynamiska beräkningarna har hittills omfattat jordskalv av magnitud 6,0 med förkastningsrörelser som kan vara representativa för postglaciala förhållanden. Avståndet mellan den seismiskt aktiva zonen och den spricka med 200 meters radie som i modellerna påverkas av skalvet har varierats mellan 200 meter och två kilometer. Vid det minsta avståndet, 200 meter, blev skjuvrörelsen hos sprickan 0,065 meter, det vill säga mindre än den rörelse som motsvarar kapselbrott enligt det kriterium som nu gäller. De resultat som nu finns antyder att det statistiska bidraget till den inducerade sprickrörelsen dominerar, åtminstone på de korta avstånd som kommer att vara viktiga för djupförvaret. Möjligen kan detta innebära att det för djupförvaret räcker att genomföra rent statistiska analyser (såsom i SR 97), vilket avsevärt skulle förenkla det fortsatta arbetet, speciellt för stora skalv för vilka det kan finnas beräknings tekniska begränsningar med dynamiska modeller. För stora skalv, där den aktiva zonen kan sträcka sig ner mot djup där bergegenskaperna skiljer sig avsevärt från de i den övre delen av skorpan, finns det dessutom osäkerheter om hur man på bästa sätt ska representera rörelsen i numeriska modeller. De försök som gjorts hittills antyder att verkan av stora skalv inte nödvändigtvis måste vara större än verkan av skalv av magnitud 6,0 för sprickor på små avstånd från den aktiva zonen. Om den aktiva zonen har en stor horisontell utsträckning, kanske hundratals kilometer, blir det seismiska momentet stort och stora mängder töjningsenergi frigörs. För en spricka på några hundra meters avstånd är det emellertid inte det seismiska momentet, utan den lokala och förmodligen magnitudoberoende spänningsförändringen som är avgörande.

En sammanställning av dokumenterade jordskalvsinducerade skador på undermarks-konstruktioner har tagits fram /19-42/. Syftet är att få fram empiriskt baserade aspekter på begreppet respektavstånd. Studien visar att effekterna, i form av dokumenterade permanenta deformationer, också i sådana fall där vägtunnlar eller järnvägstunnlar skär genom den aktiva zonen är begränsade till området allra närmast skalvet.

Inom Decovalex-projektet har möjliga termohydromekaniska effekter av framtida glaciationer på förvaret analyserats. Effekterna på förvarsnivå är troligen små, både när det gäller inverkan på den allmänna mekaniska stabiliteten och när det gäller hydraulisk spräckning /19-43/.

Program

Giltigheten hos de generella samband som finns mellan en sprickas utsträckning och den rörelse som kan ske längs sprickan (givet en belastning och en uppsättning sprickparametrar) kommer att utvärderas med hjälp av 3DEC-analyser. De generella sambanden är formulerade för idealiserade förhållanden, framför allt för elastiskt omgivande berg, och är därför konservativa så att de uppskattade rörelserna i allmänhet överskattas. Arbetet finns beskrivet i planeringsrapporten för SR-Can /19-44/.

Rörelsen hos två eller flera mindre sprickor, som samverkar via en brygga av delvis intakt berg, kan underskattas om inte samverkan mellan sprickorna beaktas. Detta ska undersökas med samma principiella metod som i 3DEC-studien ovan (generella sambandet mellan storlek och rörelse)

Programmet med dynamiska analyser av seismiskt inducerade rörelser hos sprickor som skär genom kapselhålspositioner kommer att fortsätta, framför allt med Flac3D-modeller. Möjligheten att simulera också stora skalv kommer att undersökas. Den övergripande målsättningen är att komma fram till ett väldefinierat och systematiskt beräkningsunderlag som tillsammans med bland annat resultat från andra typer av jordskalvsstudier /19-42/ kan användas för att bestämma respektavstånd.

Ett program för analys av mekanismerna (spänningsutvecklingen hos belastad elastisk skorpa vilande på viskös mantel) bakom uppkomst av postglaciala förkastningsrörelser kommer att genomföras. Analyserna görs med två- och tredimensionella Abaqus-modeller.

Möjligheten att förvaret, i samverkan med sprickor och sprickzoner, kan komma att fungera som ett svaghetsplan kommer att undersökas numeriskt med hjälp av 3DEC-modeller.

19.2.8 Sprickbildning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 fastslogs att sprickbildning jämfört med reaktivering har liten betydelse för möjliga förändringar av kapselhålsgeometrin efter förslutning.

Myndigheterna påpekar att SKB bör satsa resurser på att ta fram användbara modeller för sprickbildning, såväl ny sprickbildning som propagering av befintliga. Man framhåller å andra sidan också att den planerade aktiviteten förefaller att kunna ge svar på flertalet frågor.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Allmänna aspekter på problemet med smällberg och stabilitet hos deponeringshållsväggarna har utvecklats i en översiktsstudie /19-33/. Speciellt belyses betydelsen av ett litet mottryck från bufferten för att förhindra initiering och propagering av brott som kan leda till smällberg. Bakgrundsmaterial är teorin för spröda brott som tagits fram vid AECL:s berglaboratorium URL i Kanada.

En sammanställning av geologiska, mekaniska och termomekaniska parametervärden för bergmassan kring Apse-försöket har tagits fram som underlag för prediktering av smällbergsförekomst vid termomekanisk belastning av Apse-pelaren /19-45/.

En preliminär BEM-analys av Apse-försöket har gjorts med koden Examine3D inom en förstudie /19-34/. Den elastiska Examine3D-modellen kan inte användas för att simulera brott, men utgör underlag för bedömning av vilka områden som kan komma i brottillstånd och blir därför en plattform för utveckling av modeller där brott och sprickpropagering modelleras explicit med till exempel modellerna Fracod eller Particle Flow Code.

Preliminära 3D-resultat från termomekaniska Flac3D-simuleringar av Apse-försöket har tagits fram /19-46/. Resultaten är baserade på elastisk materialmodell, men ger, liksom Examine3D-studien, anvisningar om spänningarna och om hur dessa kan komma att förhålla sig till nivåer som är relevanta för spröda brott.

Resultat från termomekaniska JobFem-simuleringar, med känslighetsanalyser, har också tagits fram för en horisontell tvådimensionell sektion genom Apse-pelarens höjdcentrum /19-47/.

En BEM-kod, Fracod, för beräkning av sprickbildning har utvecklats vidare och tillämpats på Apse-pelaren /19-48/.

Program

Problemet med koalescens av enskilda sprickor (i 100-meterskalan) behandlas inom beräkningsprojekt för reaktivering. Dessutom testas också olika metoder för att representera effekter av sprickpropagering på enstaka stora sprickor. En av målsättningarna är att undersöka i vilken mån sprickrörelser vid stora laster kan begränsas därför att töjningsenergi förbrukas vid sprickpropagering. En preliminär modell för detta finns sedan tidigare /19-49/ men en förbättrad och mera systematisk analys behövs.

Apse-experimentet fullföljs och utvärderas. Tekniken för modellering av spröda brott och sprickpropagering utvecklas, dels med ytterligare tillämpningar med Fracod, dels med nya beräkningsverktyg och metoder. Olika modelltyper dockas till en sammanhängande analys. Områden som kan komma i brottillstånd, till exempel områden i anslutning till deponeringshållväggen i Apse-försöket, representeras med hjälp av PFC-modeller (Particle Flow Code), medan övrigt berg representeras med kontinuummodeller. Därutöver har PFC-kodens tillämpning på spänningsinducerade brott nyligen gjort framsteg genom att kunna efterlikna hela brottkurvan, både för drag- och tryckspänningar /19-105/.

19.2.9 Tidsberoende deformationer

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 framhölls att hanteringen av kryprörelser i berg hittills byggt på konservativa uppskattningar, eller gränssättningar, av möjliga effekter på hålrummens geometri.

Myndigheterna har inte lämnat några kommentarer till denna process.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Inledande beräkningar med 3DEC för att undersöka i vilken mån tunnelåterfyllningen kan begränsa konvergensen hos en deponeringstunnel har genomförts /19-50/. Den allmänna slutsatsen är att tunnelåterfyllningen inte kan bidra till att begränsa konvergens som beror på långsamma kryprörelser som sker i berget inom några tunneldiametrars avstånd från tunneln, även om den kan vara tillräcklig för att begränsa omfattningen av blockutfall och uppkomst och utveckling av progressiva brott i berget närmast tunnelväggarna.

En litteraturstudie av kryp i bergmassor, och speciellt utmed sprickor av olika typ (fyllda, ofyllda) har genomförts och rapporterats i preliminär form. En av slutsatserna av studien är att man kan förutsätta att spänningshållfasthetsförhållandet måste överstiga vissa tröskelvärden för att någon krypning alls ska ske.

Program

En litteraturstudie med syfte att gränssätta de spänningsförändringar som förvarsberget kan komma att utsättas för över tiden till följd av långsamma tektoniska rörelser kommer att genomföras.

Modellerings-tekniken, som användes i den preliminära modelleringen inom projektet Rock-Backfill, systematiseras med hjälp av data och slutsatser från litteraturstudien och tillämpas allmänt på förvarsberget, framför allt på de olika hålrummen. Målsättningen är att kunna gränssätta den konvergens av tunnlar och deponeringshål som kan tänkas ske under tusentals år till följd av bergmassans inneboende tidsberoende materialegenskaper.

19.2.10 Erosion

Erosionen av den kristallina berggrunden bedöms vara begränsad under nuvarande klimatförhållanden i de områden SKB studerar. Vittringen av berg i dagen bedöms vara av storleksordningen millimeter per 1 000 år /19-51/. Ett kallare klimat med permafrost kan förväntas leda till ökad vittring och erosion av berg i dagen. Den mest omfattande erosionen antas förekomma i samband med glaciationer. Erosionen i samband med glaciation är starkt kopplad till isens bottenförhållanden. En bottenfrusen is bevarar underlaget medan en bottenmältande is som glider över sitt underlag förväntas omfördela de lösa jordlagren och även erodera berggrunden. Erosion behandlas vidare i kapitel 21.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Långsiktig erosion av geosfären har av SKB bedömts ha underordnad betydelse för djupförvarets långsiktiga funktion och säkerhet. Myndigheterna omnämnde i granskningen av SR 97 processen som potentiellt ogynnsam. SKB skrev i Fud 2001 att man avsåg studera processen närmare.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

En skattning av den glaciala erosionens omfattning /19-52/ har genomförts baserat på antagandet att de sediment som bildats under kvartärperioden genom inlandsisars erosion fortfarande finns kvar inom det område som varit nedisat. Utifrån detta antagande har den glaciala erosionen skattats baserat på karteringar av jorddjup.

Program

Erosionen är starkt kopplad till rådande klimatförhållanden och då speciellt närvaron av inlandsisar. Processen studeras därför inom ramen för programmet för klimat, se kapitel 21.

19.2.11 Advektion/blandning – grundvattenkemi

I detta avsnitt behandlas den blandning som uppstår genom att vattnet rör sig med varierande hastighet i bergets spricksystem och hur processen påverkar grundvattenkemin. I nästa avsnitt behandlas advektion och dispersion för radionuklidtransport.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Blandningsberäkningar, med bland annat koden M3, vilka ursprungligen genomfördes med data från Äspöområdet har senare kompletterats med beräkningar, där data från andra undersökta platser i Sverige och Finland inkluderats. Det visar sig att blandningsmönstret är liknande, men proportionerna av de olika ”typvattnen” varierar från plats till plats. Emellertid finns det tydliga likheter i den utveckling de undersökta platserna sannolikt genomgått hydrologiskt och kemiskt. Man kan alltid identifiera modernt meteoriskt vatten och glacialt vatten. Ofta, men inte alltid, förekommer djupt salt vatten och vid kustlägen alltid modernt och gammalt havsvatten.

Resultat från modelleringsövningen inom den internationella arbetsgruppen Task 5 Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes visade att det är möjligt att numeriskt hantera processen advektion/blandning i stor skala och därvid utnyttja såväl hydrologiska som kemiska data.

SKI påpekar att SKB också bör redovisa den beräknade salthaltsutvecklingen för scenarier som inbegriper omfattande klimatförändringar över långa tidsintervall.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Nya modeller för grundvattenflöde har utvecklats, se även avsnitt 19.2.3 om grundvattenströmning.

Program

Datorkoden M3, som används för statistisk bearbetning med så kallad multivariantanalys, har utvecklats med stöd av SKB. Inom de närmaste sex åren är det planerat att M3 ska undergå ett flertal uppdateringar och verifieringar.

I ett nyligen startat projekt ska man utvärdera en av de utvecklade modellerna för grundvattenströmning (DarcyTools). Syftet är att modellera förhållandena runt Äspö genom att inkludera både kemiska parametrar och hydrologiska data, se 19.2.3.

Inom platsundersökningarna blir platsspecifika blandningsberäkningar viktiga för att förstå vattnets utveckling på platsen. Beräkningar av salthaltsutvecklingen vid omfattande klimatförändringar över långa tidsintervall kommer att utföras inom ramen för de närmaste säkerhetsanalyserna. Ett försök att koppla samman hydrokemi med hydrogeologiska data och beräkningar kommer att ske i kommande platsmodelleringar och säkerhetsanalyser.

19.2.12 Advektion/blandning – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i Fud 2001 eller dess granskning. I det föregående Fud-programmet 2001 behandlas flödesrelaterade parametrar för transport under de två rubrikerna ”Grundvattenströmning” och ”Radionuklidtransport – molekylär diffusion samt matrisdiffusion”.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Advektion är en process som generellt sett är välförstådd /19-53/. Sålunda har ingen egentlig ny kunskap, som motsäger tidigare kunskap, framkommit under innevarande period. Däremot har visst ytterligare stöd för existerande kunskap framkommit. Här kan nämnas simulering av advektiv transport i enskilda sprickplan /19-54/. Även om den studien främst handlar om diffusionsprocesser kan man ändå dra vissa slutsatser om hur de advektiva/dispersiva processerna påverkar transporten. Specifikt visas att effekten av transversell dispersion är liten med avseende på det så kallade transportmotståndet (F-faktorn).

Simuleringar av diskreta spricknätverk har gjorts för att förstå hur transportmotståndet (F-faktorn) beror på olika egenskaper hos nätverket /19-55/. Resultaten visar bland annat att antagandet om fullständig blandning, eller så kallad streamline routing, i korsningar mellan sprickor inte signifikant påverkar resultaten. Detta är viktigt eftersom det är svårt att belägga vilket antagande som är mest korrekt. Vidare visas att resultaten är känsliga för om sprickintensiteten, uttryckt genom det så kallade P32-värdet, dramatiskt minskar. Slutligen visas att retentionen typiskt underskattas i den typ av kanalmodeller /19-56, 19-57/ som ofta används för transportberäkningar i samband med FracMan-simuleringar. I den nu aktuella studien har transport simulerats direkt i de tvådimensionella sprickplanen snarare än att förenklas till endimensionella kanaler. Resultaten i /19-55/ har även använts i en parallell studie /19-58/. Här visas att fördelningen av $(bv)^{-1}$, där b är sprickans halv-apertur och v vattnets hastighet, följer en power-law-fördelning. Transportmotståndet (F-faktorn) är i sin tur beroende av fördelningen för $(bv)^{-1}$. Resultaten indikerar att transport som karakteriseras av denna typ av power-law-fördelningar inte kan beskrivas med en klassisk advektion-dispersionsekvation, utan

att mer sofistikerade metoder behövs om analytiska angreppssätt ska användas. Resultaten från /19-55/ har även använts i /19-59/ där man undersökt om transportmotståndet kan uppskattas från storheter mätbara i fält. Under vissa förhållanden kan transportmotståndet uttryckas som en linjär funktion av den advektiva gångtiden och en effektiv retentionsapertur. Denna apertur kan uppskattas från transmissivitetsdata eller sprickdensitets- och porositetsdata. Resultaten indikerar dock att dessa förenklade uppskattningar tenderar att överskatta retentionen, varför explicit beräkning av transportmotståndet i en numerisk diskret modell är att föredra.

Numeriska simuleringar har även utförts med koden Chan3D för transport i transienta flödesfält /19-21/. I denna studie har transport (advektion och matrisdiffusion) simulerats i ett flödesfält som förändras i tiden. Resultaten indikerar att transient flöde kan vara viktigt att inkorporera i analysen av radionuklidtransport då strandlinjeförskjutning förekommer. Denna typ av studie förutsätter en kopplad modelleringsstrategi, det vill säga att både flöde och transport simuleras i samma modell. SKB:s primära modelleringsstrategi är att kunna modellera flöde och transport separat. För att rättfärdiga ett sådant angreppssätt krävs att begränsningarna undersöks i detalj. Detta kan göras med den typ av modellverktyg som presenteras i /19-21/.

Program

Inget program kommer att initieras för att specifikt förstå advektion som process. Dock kommer studierna med advektion och matrisdiffusion under transient flöde att fortsätta. Här är målsättningen att specifikt förstå hur de transienta flödeseffekter som uppstår på grund av strandlinjeförskjutning påverkar radionuklidtransport, samt hur förenklade analyser som baseras på separat flödes- och transportmodellering kan gränsättas. Syftet är sålunda att inom till exempel säkerhetsanalysen kunna använda en kopplad modell för att på så vis få en känsla för de begränsningar som en förenklad analys innebär.

Ett projekt som syftar till att studera hur transportmotståndet (F-faktorn) kan skalas upp från detalj- till block- och platsskala har igångsatts och kommer att fortsätta. Preliminära resultat har presenterats i /19-60/. Resultaten visar hur sampling av transportmotståndet i liten skala kan användas för att beräkna transportmotståndet i större skala genom en så kallade Markov-directed Random Walk teknik. Denna teknik, som är oberoende av om fördelningen av $(bv)^{-1}$ är power-law eller inte, ska utvecklas vidare och även testas numeriskt för olika diskreta spricknätverk. Syftet med denna typ av uppskalning är att i modelleringssammanhang kunna extrapolera från mindre skalor, där en diskret spricknätverksmodell existerar, till större skalor som typiskt beskrivs med kontinuummodeller där transportmotståndet inte explicit kan beräknas.

19.2.13 Diffusion – grundvattenkemi

Detta avsnitt handlar om effekter av molekylär diffusion av grundvattenkomponenter globalt i ett mycket långt tidsperspektiv samt hur processen påverkar de hydrokemiska förhållandena. Molekylär diffusion och matrisdiffusion samt dess betydelse för nuklidtransport behandlas i nästa avsnitt 19.2.14.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Platsundersökningar i Finland har visat att de grundvattenkemiska förhållandena i Olkiluoto och i Äspö är mycket likartade. I det övre partiet ner till cirka 500 meters djup förekommer meteoriskt vatten, gammalt havsvatten och glacialt vatten i varierande proportioner. Salthalten ökar mot djupet. På större djup än 500 meter tilltar salthaltsökningen och vattnet bedöms ha en uppehållstid som vida överstiger 10 000 år. Detta tyder på att det ner till 500 meters djup pågår en dynamisk process styrd av inflöde av vatten från högre belägna områden och utflöde i lägre liggande områden. På större djup är grundvattensystemet opåverkat av denna dynamik. Det är möjligt att den tydliga gränsen mellan det dynamiska och det djupare partiet orsakats av en diffusiv transport som pågått i storleksordningen en miljon år. Om det dynamiska vattnet

har en uppmätt uppehållstid av 1 000 till 10 000 år så är motsvarande värde för det stagnanta vattnet väsentligt längre. Slutsatsen är att det djupa salta vattnet, som är rörligt i ett geologiskt tidsperspektiv, kan anses stagnant i ett 10 000–100 000-årsperspektiv.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Man har framkastat hypotesen att det djupa saltvattnet skulle ha uppkommit på grund av saltutfrysning under kalla klimatperioder /19-61/. Författarna baserade sig på analyser av jod-129 för att uppskatta uppehållstiden för det djupa saltvattnet vid en provtagningsplats i Kanada till mellan 200 000 och 1,6 miljoner år. Oberoende av hur det salta vattnet har uppkommit tenderar det att ligga kvar på grund av sin höga densitet.

Program

Detta område bedöms i dag inte kräva någon omfattande forskning, utveckling eller demonstration. Grundvattenanalyser och modelleringsstudier med syfte att undersöka vad som krävs för att det djupa saltvattnet ska bli bestående är planerade, bland annat inför nästa säkerhetsanalys och inom platsundersökningarna. Vi kommer också att undersöka om det finns möjligheter att utnyttja data från Grönland, där det finns en tjock inlandsis, för att kontrollera modellerna för grundvattenflöde och saltfördelning vid sådana förhållanden, se också avsnitt 19.2.24.

19.2.14 Diffusion – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 presenterades projektet för mätning av diffusivitet i fält, men resultat fanns inte framme vid den tidpunkten. Vidare konstaterades att en samsyn i frågor om retention, i synnerhet matrisdiffusion, bör uppnås mellan de inblandade säkerhetsanalysaktörerna.

SKI konstaterar i sin utvärdering av Fud 2001 att SKB bör utreda hur storheter som påverkar matrisdiffusion, till exempel den flödesvätta ytan, kan mätas i fält, se avsnitt 19.2.12. Vidare vill SKI att SKB utför processorienterade studier av matrisdiffusion i sprickfyllnadsmaterial samt i intakt berg.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Med diffusion förstås här både diffusion i det strömmande vattnet och diffusion från strömmande till stagnant vatten. Det stagnanta vattnet förekommer företrädesvis i matrisen (matrisdiffusion) eller i lågkonduktiva delar av själva sprickplanen.

Diffusion i strömmande vatten är ointressant i den longitudinella riktningen, det vill säga i vattnets strömningsriktning. I den transversella riktningen är denna diffusionsprocess av intresse för att bedöma relevanta längdskalor över vilka blandning sker för olika tidsskalor. Exempelvis sker blandning över kortare längder vid experimentella tidsskalor än vid de tidsskalor som är av intresse för säkerhetsanalysen. Dessa längdskalor är av intresse då radionuklidtransport ska konceptualiseras för modellering. Även frågan om omblandning sker i sprickkorsningar är beroende av diffusion i vattenfasen. Dessa frågeställningar belyses i det pågående EU-projektet Retrock /19-62/.

När det gäller diffusion in till stagnant vatten är matrisdiffusion den mest intressanta processen. Hit räknas också indiffusion i de sprickfyllnadsmaterial (gouge) och omvandlade zoner (altered rim zones) som typiskt återfinns i naturliga sprickor. Fältförsök utförda vid Äspö, True-1 /19-63/ och True Block Scale /19-64 till 19-67/, visar att det förmodligen främst är diffusion i gouge och en omvandlade rim zone som observeras i tidsskalor som är typiska för fältförsök. De utförda studierna bekräftar också att denna diffusion är heterogen till sin natur främst beroende på en rumslig variation av porositeten i de material som diffusion sker i. En porositetsprofil vinkelrätt sprickplanen har observerats; den omvandlade zonen närmast sprickan har förhållandevis hög

porositet, medan det intakta berget längre in har lägre porositet /19-68/. Modelleringsverktyg har utvecklats för att kunna beskriva denna typ av heterogenitet /19-66, 19-69/.

Eftersom transportexperiment i fält med spårämnen typiskt mäter matrisdiffusion in i material andra än den intakta matrisen är det även av intresse att kunna mäta diffusion i fält in i den intakta matrisen. För detta ändamål planeras ett experiment kallat Long Term Diffusion Experiment (LTDE) /19-70/. Geologisk karakterisering av den tänkta platsen för experimentet har utförts, och hydrogeologiska tester ska utföras. Under 2004 ska den experimentella utrustningen testas och konceptet för experimentet granskas.

Elektriska metoder (elektrisk konduktivitet) kan användas in-situ som ett alternativ för att uppskatta formationsfaktorn (som kontrollerar bergets inverkan på diffusion). Ett pågående doktorandprojekt har sammanfattat kunskapsläget, identifierat öppna frågor och presenterat preliminära resultat /19-71, 19-72/. För att uppskatta formationsfaktorn behövs mätningar av bergets resistivitet, porvattnets resistivitet samt en uppskattning av bidrag från ytkonduktion. Effekten av ytkonduktion minskar då vattnets salinitet stiger.

Program

Inom Long Term Diffusion experimentet ska enligt planerna de egentliga mätningarna startas under innevarande period, efter att karakteriseringen har slutförts och experimentkonceptet har utvärderats.

Doktorandprojektet, som handlar om elektriska metoder för att uppskatta formationsfaktorn in-situ, kommer att avslutas under innevarande period. Metoden testas på borrkärnor från platsundersökningsprogrammet. Vidare undersöks metoder för att uppskatta porvattnets konduktivitet (vanligen antas att porvatten och vatten i sprickorna har samma konduktivitet). Slutligen undersöks metoder för att korrigera mätningar vid låg salinitet, det vill säga då effekten av ytkonduktion kan vara stor.

Inom platsundersökningsprogrammet utförs även diffusionsmätningar i laboratorium på platsspecifikt material. Dessa undersökningar beskrivs närmare i /19-73/.

19.2.15 Reaktionen med berget – grundvatten/bergmatris

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

På lång sikt bestäms grundvattnets kemi av reaktioner med bergets primära mineral. Dessa vittrar och avger ämnen i löst form till grundvattnet.

Grundvattnets sammansättning i sprickor, ett relativt välstuderat område, är ofta påverkat av både blandning och reaktioner. Matrisvattnets sammansättning däremot, förväntas främst bero på reaktioner mellan bergmineral och grundvatten. Vid Äspölaboratoriet startades ett experiment med syfte att studera matrisvattnets sammansättning och ålder, samt fastställa effekten av diffusionsprocesser på sammansättningen. En tolkning av resultaten är att så kallat matrisvatten utgör en mycket liten del av det vatten som samlats upp i borrhålet. Merparten kommer ifrån sprickor och mikrosprickor som har förbindelse med större strukturer. Därmed finns det ingen anledning att misstänka att ett mycket salt vatten orsakat av matrisen skulle tränga in i deponeeringshålen i något skede.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Inom Matrisförsöket i Äspölaboratoriet /19-74/ har man provtagit och analyserat in-situ-matrisvatten, det vill säga vatten som befinner sig i porerna i berget vilka är tillgängliga för interaktion med vatten som cirkulerar i sprickorna. Resultat från experimentet visar att kontakten mellan matrisvatten och grundvatten i sprickorna sker genom flöde i ett nätverk av mikrosprickor som har små dimensioner och låga hydrauliska konduktiviteter. Lösta ämnen transporteras inom bergmatrisen genom diffusion. Matrisporvattnet har bevarat bräckta och salta

vatten som är gamla, minst från förra glaciationen, det vill säga mer än cirka 10 000 år gamla. Denna relativt snabba vattenomsättning för matrisvattnet vid Äspö stöds av observationer av att berget generellt har hög permeabilitet. Därför finns det bara en liten komponent i matrisvattnet som orsakats av långvariga reaktioner mellan berg och vatten.

Erfarenheterna från Matrisförsöket vid Äspö har överförts till platsundersökningarna. Diffusionsexperiment i laboratorieskala har utförts med prov från olika djup i Simpevarp. Experimenten tyder på olika sammansättningar med salthalter som ökar mot djupet.

Program

Eventuellt kommer Matrisförsöket i Äspö att kompletteras med ytterligare mätningar. Utöver dessa undersökningar bedöms området i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

19.2.16 Reaktioner med berget – lösning/fällning av sprickmineraler

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Upplösning och utfällning av sprickmaterial är en ständigt pågående process. Den största andelen har bildats under hydrotermala förhållanden, men även lågtemperaturmineral förekommer och dessa kan utnyttjas för att förstå grundvattenkemins utveckling, till exempel avseende redoxförhållanden.

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 vid 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.

För att kunna utvärdera risken att glacialt smältvatten når förvarsdjup gjordes en genomgång av befintliga data från främst Äspö och Klipperås (förekomst av redoxkänsliga mineral etc) men även andra platser /19-75/.

Både utvärderingar av vattenkemi /19-76/ och sprickmineralogi /19-77/ visar att det finns klara indikationer på att komponenter av ett glacialt smältvatten har nått till stora djup (djupare än 500 meter). Men det finns inga spår som tyder på att detta vatten skulle ha varit syresatt under cirka 50 meters djup. Däremot finns det starka indikationer på att reducerande förhållanden har rått på djup under 100 meter under lång tid /19-77, 19-78/. Det är därför olyckligt att knyta förekomsten av glacialt smältvatten till oxiderande förhållanden.

I Rex-projektet (Redox Experiment in Detailed Scale) studerades hur syre som lämnas kvar vid stängningen av ett förvar kan reagera med mineral och grundvatten i berget runt tunneln, deponeringshålen eller längs de vattenförande sprickorna /19-79/. Resultaten från in-situ-försöket bekräftades av replikaexperiment i laboratorium. Båda undersökningarna visade att syre hade konsumerats helt efter några dagar. Överensstämmelsen var påfallande god med tanke på olikheter i experimentella förhållanden. De huvudsakliga slutsatserna från projektet var:

- En påtaglig och snabb syreförbrukning påvisades för geosfären.
- Mikrobiell aktivitet bidrog väsentligt till syrekonsumtionen.
- Metan och vätgas som diffunderar upp genom jordskorpan förväntas bidra med betydande reduktionskapacitet.

Utöver hastigheten för syreförbrukningen är den tillgängliga buffertkapaciteten av stor betydelse. För oorganiska reaktioner mellan syre löst i vatten och reducerande ämnen (tvåvärt järn och sulfid), i lösning och i sprick- och matrismineral kan man uppskatta buffertkapaciteten. Då det gäller kapaciteten hos mikrober återstår en del grundläggande forskning, se mikrobiella processer, avsnitt 19.2.18.

SKI påpekade i sin granskning av Fud 2001 att ett scenario med förändrade redoxförhållanden på försvarsdjup kan anses ha mycket låg sannolikhet, men att detta fall inte rimligen kan uteslutas.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Försök med vittring av sprickfyllnadsmineralet klorit har utförts /19-80/. Klorit är ett vanligt mineral i sprickor och förekommer dessutom som omvandlingsmineral i omgivande bergmatris. Klorit innehåller oftast signifikanta mängder järn(II) och kan därför ge en del av buffertkapaciteten mot intrång av syrehaltiga grundvatten.

Equip var ett EU-projekt som pågick under 1997–2000 och som syftade till att utnyttja sprickmineral, främst kalcit, som indikatorer på nuvarande och tidigare grundvattenkemi /19-77/. Rent allmänt framstår kalcit som det mest användbara mineralet, då det kan bildas under mycket olika betingelser och dessutom ger information om vilken typ av grundvatten som kalciten bildats ur. Sammansättningen av isotoper och spårelement är därvid till hjälp. Även sulfidmineral och järnoxider eller järnoxihydroxider kan vara användbara vid tolkningen av redoxförhållanden. Equip har avlösts av EU-projektet Padamot som pågår till 2006.

Uranserieanalyser från ler- och hematitrika sprickfyllnader från Äspö har utvärderats tillsammans med analyser av uran-234 och uran-238. Resultaten stöder tolkningen att nuvarande redoxfront (övergång från oxiderande till reducerande förhållanden) inte når större djup än cirka 30 meter på Äspö /19-81/.

Den rådande palaeohydrogeologiska bilden av Äspö/Laxemar-området är att fyra olika zoner har kunnat urskiljas; (1) en övre zon där redoxförhållandena har varierat och där både kalcitupplösning och utfällningen har ägt rum, därefter kommer (2) en zon (ned till cirka 500 meter) med aktiv kalcitutfällning under olika grundvattenregimer (både marina och meteoriska) vilket har lett till att zonerade kalciter är vanligt förekommande och även gamla hydrotermala kalciter har bevarats. Tillförsel av organiskt material ger förutsättningar för aktivitet av sulfat-reducerande och järn/mangan-reducerande bakterier. (3) Ned till cirka 1 000 meter har potentiella sötvattenkarbonater påträffats i sprickorna. Däremot syns inte några tydliga indikationer på marina karbonater. Organiskt material når ned till dessa djup men blir successivt mindre påtagligt mot djupet. (4) Under cirka 1 000 meter råder relativt stagnanta förhållanden och lågtemperaturkalciter är sällsynta /19-82/.

Program

Fortsatta försök med vittring av järnhaltiga sprickfyllnadsmineral är planerade inom den närmaste sexårsperioden. Studier av sprickmineral som indikatorer på tidigare grundvattenkemi kommer att fortsätta inom EU-projektet Padamot. Ett projekt som syftar till att studera Fe(III)-oxider på Äspö har påbörjats. Egenskaperna hos dessa oxider kan vara användbara för att fastställa tidigare redoxförhållanden.

Nya beräkningar planeras inför nästa säkerhetsrapport för att ta reda på hur djupt ett glacialvatten kan tränga och hur djupt syresatt glacialvatten kan nå innan syret förbrukats. Problemet med dateringar, direkta och indirekta av sprickmineral är fortfarande inte löst. Området bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

19.2.17 Reaktionen med berget – sorption av radionuklider

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterades att försök med Chemlab-sonden ska fortsätta, medan det i övrigt inte planerades för några större insatser.

Redan i granskningen av Fud 98 påpekade SKI att både en relevant databas över K_d -värden samt en god processförståelse för sorption är viktiga. Denna ståndpunkt upprepades i granskningen av Fud 2001. SKI säger även att ytkomplexeringsmodeller bör utvecklas för att stödja K_d -konceptet, samt att sorptionskinetiska effekter bör utredas. Vidare vill myndigheten se sorptionsstudier av platsspecifikt material.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2001

Ett flertal projekt syftar till att utöka kunskapen om sorption, bland annat Äspöprojektet RNR (Radionuclide Retention) och True (Tracer Retention Understanding Experiment).

I projektet RNR Actinide har migration av aktinider studerats i en borrhärlinje med en långsgående spricka. Borrhärlinjen monterades i borrhållslaboratoriet Chemlab-2, som sedan placerades i ett borrhål på 450 meters djup i Äspölaboratoriet. Sprickan jämviktades med grundvatten innan en lösning av aktinider (maxlöslighetshalter av fyrvärd plutonium-244, trevärd americium-243 och femvärd neptunium-237) injekterades i sprickan från en reservoar i Chemlab-2. Efter aktinidinjektionen pumpades grundvatten genom sprickan under en längre period. I försöken följde mellan 20 och 40 procent injekterad neptunium med grundvattnet i form av okomplexerad neptunyljon (NpO_2^+) (samma genombrott som HTO). Ju längre uppehållstid i sprickan, desto lägre halter av femvärd neptunium observerades i eluatet. Inget plutonium återfanns i eluatet, medan americium återfanns i halter av storleksordningen $1 \cdot 10^{-11}$ mol/l /19-83/. Likadana försök har även genomförts i laboratorier ovan jord. Inom ramen för RNR Actinide har även batch-sorptionsförsök med samma aktinider som i fältförsöken och sprickfyllandsmaterial/krossad granit genomförts i ovanjordlaboratorier. Dessa visade ett klart tidsberoende för sorption av aktiniderna i fråga.

Inom True-försöken har även viss kunskap om sorption framkommit. Dessa resultat beskrivs nedan i avsnitt 19.2.26.

I det pågående EU-projektet Retrock görs en kunskapsammanställning över sorption och sorptionsmekanismer /19-62/. Retrocks slutrapport kommer att färdigställas under 2004.

Program

Inom ramen för aktinidmigration i en borrhärlinje med långsgående spricka kommer ett försök med samma försöksuppställning som för aktinidmigrationen (se ovan) att genomföras med uran och teknetium.

Inom olika internationella samarbetsprojekt, såsom Geotrap inom OECD/NEA och Retrock inom EU, har det framkommit att det kan finnas behov även inom säkerhetsanalys av en mer processororienterad beskrivning av de retentionsprocesser som ofta samlas under benämningen sorption. De processer som främst är av intresse förutom ren sorption är fällning, medfällning och ytfällning. De processer som vanligtvis inkluderas i sorption är främst av typen jonbytesprocesser och ytkomplexeringsprocesser.

Processbaserade modeller kan dels ge en bättre processförståelse, dels användas för att gränsätta förenklade modeller baserade på fördelningskoefficienter vid jämvikt (K_d -värden). SKB planerar att under innevarande treårsperiod utvärdera behovet av processororienterad sorptionsmodellering för specifikt säkerhetsanalys. Om ett behov framkommer att utveckla denna typ av modelleringskapacitet kommer sådan också att inledas. En uppenbar fördel med denna typ av modeller är att de kan användas för att studera hur retentionen påverkas av förändringar i grundvattenkemin såsom till exempel pH-ändringar. En ny uppgift (Task) har även föreslagits

för arbetsgruppen Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes som skulle gå ut på att omtolka True-1 experimenten med en mer processororienterad modelleringsstrategi för retention. SKB fortsätter även att stödja mer grundläggande studier av ytkomplexering.

Under innevarande period kommer ett licentiatprojekt att bedrivas för att utveckla metoder att bestämma K_d -värden på intakta bergbitar med hjälp av elektriska metoder. Två problem med traditionell mätning av K_d -värden är att de antingen görs på krossat bergsmaterial, eller via diffusionsförsök på intakta bergbitar vilket är mera relevant, men tar väldigt lång tid. Tanken med det planerade projektet är att undersöka om en elektrisk potential kan användas för att snabba upp inträngningen av sorberande nuklider i intakta bergbitar. I preliminära försök med ickesorberande ämnen har inträngningshastigheten ökat med cirka en faktor 1 000 /19-84, 19-85/.

Inom platsundersökningsprogrammet utförs även sorptionsmätningar i laboratorium på plats-specifikt material. Dessa undersökningar beskrivs närmare i /19-73/.

19.2.18 Mikrobiella processer

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Mikrober påverkar grundvattnets kemi genom att de påskyndar reaktioner som annars sker mycket långsamt. Främst påverkas redoxreaktioner, men även vittringsreaktioner kan katalyseras.

Forskning i Äspölaboratoriet och på andra platser har visat att olika typer av mikrober lever i urbergets sprickor. Vissa lever av organiska kolföreningar som följer med infiltrerande meteoriskt vatten från jordytan medan andra kan leva av metan och vätgas från jordens mantel /19-86/.

Mikroberna i underjorden kan leva utan syre, en del är så känsliga för syre att de dör om syre förekommer i deras miljö. Många av de underjordiska mikroberna äger dock förmågan att konsumera syre, vilket Rex-försöken visat /19-87/. När syre inte finns som oxidationsmedel kan olika mikrober istället utnyttja andra föreningar, till exempel svavlet i sulfatjoner (SO_4^{2-}) under bildning av sulfid (S^{2-}), järnet i olika mineral (Fe^{3+}) som då löses ut till grundvattnet (i form av Fe^{2+}). Även mangan (Mn^{4+}) i brunsten kan användas av mikrober och löses då ut till grundvattnet (Mn^{2+}). Åtskilliga mikrober i grundvatten bryter ner organiska kolföreningar till koldioxid för att få energi, medan andra har vätgas som energikälla. Tillsammans får dessa mikrobers livsföring i grundvattnet en viktig inverkan på den geokemiska miljön i bergets vattenfyllda sprickor /19-88/.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Biologiska järnoxider (Bios) bildas av bakterier när anaerozt järninnehållande grundvatten når miljöer med syre. Stora mängder järnoxider blandat med mikrober och deras utsöndringsprodukter har visat sig vara mycket effektiva filter för spårmetaller /19-89/. Försöken har utförts på 300-meternivån i Äspölaboratoriet. Retardationen av spårmetaller i Bios överstiger betydligt retardationen i oorganiska järnoxider. Bios bildas där grundvatten tränger upp till jordytan. Eventuellt migrerande radionuklider kommer effektivt att fångas in av Bios, vilket leder till lokalt ökande koncentrationer, men regionalt lägre koncentrationer, jämför med en situation utan Bios.

Laboratorieundersökningar, med avseende på förmåga att mobilisera metaller har utförts på bakteriestammar som isolerats från stort grundvattendjup. Resultaten visar att de undersökta organismerna utsöndrar komplexbildare som till exempel kan mobilisera uran ur Ranstadskiffer /19-90/. Fortsatta underökningar har visat att dessa komplexbildare också förmår mobilisera radionuklider från fasta faser av kisel och titanoxid. Försöken har utförts i en aerob miljö. Undersökningar pågår under anaeroba förhållanden.

Svamp, främst jästsvampar har påträffats i grundvatten från förvaringsdjup i låga men signifikanta mängder /19-91/.

Mikrobiell syrekonsumtion i en spricka har modellerats /19-92/. Beräkningarna inkluderade också oorganiska processer, till exempel pyritoxidation, och utvärderade ett fall där en oändlig mängd syresatt vatten strömmar igenom en spricka. Modellresultaten visar att mikrobiella processer borde ha en stor effekt på kort sikt, men att oorganiska reaktioner tar över i långa tidsperspektiv.

Program

Ett laboratorium på 420 meters djup i Äspölaboratoriet möjliggör fortsatta arbeten kring mikrober och deras betydelse i djupförvaret i ett projekt benämnt Microbe. Borrhål har instrumenterats och grundvattnets kemi och mikrobiologi har karakteriserats och rapporterats. Sammansättningen av grundvatten och mikrobinnehållet är relativt typiskt för grundvatten på detta djup. I laboratoriet finns möjlighet att arbeta anaerozt i en box. Tre stycken system med cirkulerande grundvatten från sprickor inne i berget möjliggör studier av mikrobiella processer under förvaringsförhållanden (in-situ-förhållanden avseende tryck, kemi och temperatur). I laboratoriet finns en gaskromatograf och utrustning för gasextraktion installerad. Mätningar av gas kan ske direkt efter provtagning i laboratoriets odlingssystem eller efter provtagning längst tunneln. På 300 meters djup har konstgjorda diken installerats för undersökningar av Bios (biologiska järnoxider). En serie olika experiment planeras på dessa båda platser.

Bios har visat sig ha mycket hög affinitet för spårmetaller. Anaeroba biofilmer (mikrober på ytor) består av substanser som liknar dem i Bios. Försök är under utförande där immobilisering av olika radionuklider, bland annat kobolt-60 and prometium-147 studeras. Fortsatta försök omfattar studier av biofilmer på olika mineral.

Komplexbildande substanser har påvisats från bakterier som växer med syre. Dessa ligander bildas för att mikroorganismerna ska få tag i viktiga spårämnen, av vilka många har mycket låg löslighet under förhållanden med syre, till exempel järn. Under syrefria förhållanden ökar tillgången på spårmetaller, vilket bör innebära inget eller litet behov av komplexbildare. Försök ska utföras på mikrober som växer syrefritt i Mikrobiologilaboratoriet på 420-meternivån i Äspölaboratoriet. Vi avser studera om komplexbildare produceras under förvaringslika, syrefria förhållanden.

I Rex-försöken /19-87/ framkom att mikrobiell syrereduktion är en viktig process. I ett nytt projekt undersöker vi förekomst och aktivitet av metanoxiderande mikrober i Äspölaboratoriet och på undersökningsplatserna. Metoder för mätning av mikrobiell syrereduktion utvecklas.

Kunskapsbasen om mikrobiella processer i förvaringsberg växer kontinuerligt. Det finns nu så mycket information att meningsfullt modelleringsarbete kan utföras. Flera olika viktiga mikrobiella processer ska modelleras. Mikrobiell syrereduktion med metan och organiskt material beräknas. Beräkningar av sulfatreduktion nära deponeringshål utreds. Mikrobiella processers bidrag till bergets långsiktiga barriärfunktion är också i fokus.

19.2.19 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Processen har betydelse för geosfären i ett initialt skede och i nära anslutning till förvaret, då förhållandena påverkas av utbyggnaden och av stål och cement i förvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Ett in-situ-experiment pågår i Grimsel, Schweiz, med syfte att studera hur betongporvatten reagerar med bergmineral. De resultat som hittills har kommit fram redovisas i kapitel 25.

Program

I samarbete med Posiva har ett projekt startats för att utveckla och testa injiceringsmaterial som ska ha lakvatten med pH lägre än 11.

Övriga oorganiska konstruktionsmaterial är huvudsakligen stål. Detta område bedöms i dag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

19.2.20 Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Kolloider är små partiklar som inte sedimenterar. De kan således följa med grundvattnet och även fungera som bärare av radionuklider. SKB har i mer än tio år utfört studier och mätningar på kolloider. Slutsatsen från dessa studier både nationellt och internationellt är att kolloidinnehållet i grundvattnet i svensk granitisk berggrund främst utgörs av ler-, kisel- och järnhydroxidpartiklar och att medelhalten är 20–45 ppb, vilket är lågt. Halten begränsas av att kolloiderna fäster på sprickytorna, vilket minskar deras stabilitet och transportkapacitet. I Nevada, USA, där hundratals underjordiska atombombstester har utförts, visar mätningar av plutonium att kolloidfraktioner i grundvattnet kunnat spåras 1,3 kilometer från detonationsplatsen. Man har därför en indikation på en snabb kolloidtransport.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Kolloidprojektet initierades hösten 2000 och avslutas 2004. Projektets syfte är att klarlägga kolloiders stabilitet, deras potential att transportera nuklider samt bentonitens potential att generera kolloider. Bentonitlerans roll som kolloidkälla undersöktes vid varierande grundvattensalthalter (NaCl/CaCl) i laboratorieförsök. Man studerade bland annat kemiska förändringar, storleksfördelningar och effekterna från natrium- och kalciumrik bentonit.

Bakgrundshalten av kolloider i olika vattentyper och sprickzoner mäts med bland annat en högupplösande laserutrustning. Resultaten visar att den naturliga kolloidhalten minskar med ökande salthet och djup. Kolloidhalten på Äspö är mindre än 300 ppb och på förvarsdjup är halten mindre än 50 ppb.

Totalt installerades sex stycken bentonitreaktorer i Äspölaboratoriet och i Olkiluoto, Finland. Man fann att kolloidproduktionen från bentoniten under naturliga förhållanden är liten och att den inte påverkades av flödes hastigheten.

Program

Det finns planer på att studera transport av kolloider mellan två närbelägna borrhål vid Äspölaboratoriet. Borrhålen penetrerar samma sprickzon, den så kallade True feature B, som har en relativt homogen geologi. Experimentet ska kompletteras med laboratorieförsök och experiment med kolloidtransport av radionuklider i en borrhåll i Chemlab-apparaturen i Äspötunneln.

19.2.21 Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstateras att viss modellutveckling, främst av analytisk karaktär, kommer att ske för att kunna kvantifiera betydelsen av kolloidal transport.

I sin granskning av Fud 2001 konstaterar SKI att SKB bör skaffa sig en bättre förståelse av de processer som styr transport och mobilitet av kolloider, samt vid behov inkorporera dessa processer i säkerhetsanalysen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Under innevarande treårsperiod har generisk modellering av nuklidtransport med kolloider utförts. I /19-93/ visas att effekten av eventuella kolloider kan vara betydelsefull för vissa parameterkombinationer vid transport av plutonium för förhållanden som i övrigt är jämförbara med situationen på Äspö. Specifikt visas att filtreringshastighet av kolloider är en viktig parameter. Dock är värdena på denna parameter i princip okända. Denna studie visar att relevanta processer kan inkorporeras i modeller för radionuklidtransport, men att osäkerheten i parameterintervall är stor. Denna osäkerhet beror till stor del på bristande processkunskap.

Översiktliga beräkningar har utförts som en förberedelse för ett eventuellt spårämnesförsök med kolloider i fältskala /19-94/. Försöket, om det blir av, skulle ingå i Kolloidprojektet och utföras på den plats nere i Äspölaboratoriet där True-1 är belägen. Beräkningarna visar vilka parameterkombinationer som i så fall är lämpliga för att kunna detektera transport med kolloider i fält /19-94/. Arbetet visar även hur kolloidtransport kan inkorporeras med modeller för radionuklidtransport.

En numerisk variant av SKB:s kod för radionuklidtransport i geosfären, Farf31, har utvecklats för att kunna hantera transport av radionuklider med kolloider /19-95/. Samma konceptualisering av kolloidtransport som i SKI:s studie /19-96/ har använts. Detta innebär att nuklidtransport förekommer på en separat kolloidfas, och att upptaget av nuklider på kolloiderna beskrivs med en sorptions-desorptionsmodell. Den numeriska Farf-modellen kan reproducera resultaten i SKI:s studie och även hantera kedjesönderfall.

Program

Om spårämnesförsök med kolloider kommer att utföras inom Kolloidprojektet, se avsnitt 19.2.20, så kommer även modellering av experimenten att utföras. Modelleringen kommer då att bygga på de erfarenheter och den kodutveckling som redovisats i /19-94/.

Genom att utnyttja den nyutvecklade numeriska versionen av Farf31 kommer effekten av kolloider på radionuklidtransport att undersökas mer i detalj för olika scenarier och parametervariationer. Baserat på dessa studier kommer strategin för hur kolloider ska hanteras i säkerhetsanalysen att utarbetas.

19.2.22 Gasbildning/gaslösning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Gaser som förekommer lösta i grundvattnet är av varierande sammansättning. Huvudkomponenterna är vanligen följande, ordnade efter sjunkande koncentration: kväve, metan, argon, helium, koldioxid, väte och kolmonoxid. Dessutom förekommer spår av etan, eten, acetylen, propan och propen. Den totala mängden löst gas per liter undersökta svenska grundvatten pendlar från ungefär 30 milliliter till cirka 100 milliliter, ned till en kilometer under markytan. Dessa mängder ligger betydligt under löslighetsgränserna för de påträffade gaserna, vid gällande tryck på respektive djup. I finska grundvatten har annorlunda sammansatta och högre gasmängder påträffats, upp till 0,3–0,4 dm³ gas per liter grundvatten /19-97/. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i Fud 2001.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Databasen över lösta gaser i grundvatten byggs kontinuerligt på /19-86/, dels med data från grundvattnen runt Äspölaboratoriet och dels med data från grundvattnen vid platsundersökningarna.

Program

System för gasanalys och forskning om gaser i grundvatten har installerats under jord på Äspölaboratoriet och på ett laboratorium vid Göteborgs universitet. Nya metoder har utvecklats för extraktion och analys av samtliga förekommande gaser. Forskning pågår kring gasernas inverkan på förekomst och aktivitet av mikroorganismer samt mikroorganismers påverkan på gasinnehåll och sammansättning. Dessa undersökningar finns redovisade i avsnitt 19.2.18.

19.2.23 Metanisomsättning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Vid låg temperatur och högt tryck bildar vatten och metangas en fast fas som kallas metanis. Metanis kan bildas till exempel under permafrost.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

SKB har tillsammans med forskare från Finland och Kanada studerat en guldgruva i permafrostområde i Kanada (Lupingruvan). Ingen metanis påträffades.

Program

Studier kring gruvan i Kanada kommer att fortsätta.

19.2.24 Saltutfrysning

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Då saltvatten fryser långsamt tvingas lösta ämnen (salter) ut i lösning. Processen kan ha betydelse i samband med kallt klimat, till exempel under en period med permafrost.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Undersökningar i Lupingruvan i permafrostområdet i Kanada har inte kunnat påvisa effekten av saltutfrysning.

Program

Undersökningarna i Lupingruvan kommer att fortsätta. Om saltutfrysning sker, kommer de salta vattnen att röra sig mot djupet på grund av sin större densitet och läggas till de salta grundvattnen som redan finns på större djup. Det är därför inte troligt att man kan hitta ansamlingar av salt grundvatten under lager av permafrost. Se också avsnitt 19.2.23 ovan.

19.2.25 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling

Grundvattnets sammansättning är i kombination med grundvattenflödet av stor betydelse för slutförvarets funktion, både på kort och på lång sikt. Växelverkan mellan ingenjörbarriärerna och grundvattnet bestämmer hur länge det använda kärnbränslet kommer att förbli isolerat. Även i en situation då isoleringen brutits har grundvattnet en avgörande betydelse för upplösning och transport av radioaktiva ämnen i bränslet.

Grundvattenkemiprogrammet syftar till att beskriva grundvattnets kemi i djupförvarsvolymer och dess omgivning ur ett säkerhetsanalytiskt perspektiv och ge det kemiska underlag som krävs för projektering av djupförvaret. Generellt bidrar geokemiprogrammet till en övergripande

förståelse för hur grundvattensystemet fungerar på förvarsdjup. Hydrogeokemiska och hydrogeologiska data ger tillsammans en beskrivning av vattenomsättningen inom förvarsområdet och dess påverkan på grundvattensammansättningen samt hur denna varierar i den tilltänkta förvarsvolymen.

Den enklaste hydrokemimodellen är en fördelning i rymden av halterna av de viktigaste lösta ämnena i bergvolymen. Vanligtvis undersöker man fördelningen av huvudkomponenterna natrium, kalium, kalcium, mangan, klor, sulfat och vätekarbonat inklusive pH, men att även ta med de stabila och radioaktiva isotoperna deuterium, syre-18, svavel-34, kol-14, kol-13, tritium och strontium-87 är av stort värde. Fördelningarna av de enskilda lösta ämnenas halter kan i vissa fall indikera specifika pågående kemiska processer.

Mer kunskap nås genom 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 sinsemellan kan deras olika utvecklingsvägar identifieras oavsett var i volymen de förekommer. Inom varje klass definieras ett typvatten (för den klassen). Typvattnet utgör grund för fortsatta beräkningar av reaktioner och blandningsförhållanden. I dessa beräkningar kan mätdata för till exempel de tio viktigaste komponenterna ingå /19-76/. De framräknade blandningsproportionerna och den verkliga uppmätta sammansättningen utgör grund för att beräkna omfattningen av kemiska reaktioner. Man antar då att en avvikelse i halt hos någon av de ingående komponenterna är resultat av en kemisk reaktion som inträffat efter det att vattnet blandats. Det kan vara fråga om upplösning eller utfällning av olika mineral eller mikrobiella processer som genererar till exempel sulfid, karbonat, tvåvärt järn med mera. För denna hydrokemiska modellering används koden M3 (Mixing an Mass balance Modelling) som har utvecklats med Matlab som bas, se avsnitt 19.2.11. Resultatens rimlighet kontrolleras med alternativa modelleringar, till exempel geokemiska simuleringar med koden Phreeqc.

På senare tid har kunskapen om de mikrobiella processerna ökat /19-88/. Det har visat sig att dessa har stort inflytande på den hydrogeokemiska utvecklingen och därmed den hydrogeokemiska tolkningen.

En ständigt återkommande fråga är om grundvattenproverna verkligen representerar grundvattnet på det djup där de tagits. Studier av sprickmineral kan bidra till att utvärdera det hydrogeokemiska systemets stabilitet och representativitet. EU-projektet Equip /19-77/ har haft som huvudsaklig uppgift att föreslå lämpliga metoder för att samla in palaeohydrologisk information, det vill säga samla information från sprickmineral om nuvarande och tidigare vattenkemi. De undersökningar av sprickmineral som gjorts på Äspö indikerar en uppdelning i tre olika zoner, där zonen under 800 meters djup förefaller vara relativt isolerad.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Sammanvägt har resultaten från specifika hydrokemimodelleringar baserade på data från Äspö och Olkiluoto givit en bild av vilka förändringar i grundvattensammansättningen som kan förväntas i framtiden /19-98/. Under den kommande 1 000-årsperioden förväntas dagens situation i stort att råda. I ett 10 000-årsperspektiv kommer landhöjningen och eventuella klimatförändringar att påverka dagens situation på ett sätt som kan beräknas med tillgängliga hydrogeologiska och hydrokemiska modeller. I ett 100 000-årigt perspektiv avgör antaganden om då rådande klimatförhållanden helt vilken situation som kan tänkas förekomma. I detta tidsperspektiv är det meningsfullt att identifiera vilka klimatsituationer som kan förorsaka de största förändringarna och analysera effekterna av dessa.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Nya data framtagen inom platsundersökningsprogrammet motsäger inte blandningsmönstret som tagits fram med data från andra undersökta platser i Sverige och Finland. Men det finns fortfarande för få kemianalyser tillgängliga för att dra definitiva slutsatser.

Program

Det finns inga planer på metodutveckling inom området. Tillämpning av metodiken sker inom ramen för platsundersökningsprogrammet.

19.2.26 Integrerad modellering – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterades angående modellstudier att den endimensionella transportbeskrivningen samt dispersionsformuleringen borde utvärderas med hjälp av mer komplexa modeller. Vidare konstaterades att Farf31 borde jämföras med modeller med högre processkomplexitet för retention. Specifikt avsågs modeller med heterogenitet i diffusions- och sorptionsegenskaper i matrisen. Slutligen konstaterades att Farf31 borde uppdateras med avseende på hur indata formuleras så att information avseende transportmotståndet direkt kan användas i modellen.

I Fud 2001 konstaterades angående fältstudier att främst ytterligare utvärdering av True Block Scale resultat skulle ske.

I sin utvärdering av Fud 2001 stödde SKI utvecklingen av transportmodeller för radionuklider som kan ta hänsyn till heterogenitet (variabelt penetrationsdjup) i matrisegenskaper. Vidare ville man se en rapport som sammanfattar konceptuella antaganden, matematiska formuleringar samt vetenskapligt stöd för Farf31. SKI konstaterar också att om resultaten från True indikerar att retention endast kan beskrivas i sammanhanget transport i ett tredimensionellt nätverk av sprickor, så bör SKB redovisa de förenklingsfel som kan uppstå vid en tillämpning i den endimensionella Farf31-modellen.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2001

Modellstudier

Inom den internationella arbetsgruppen Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes har Task 4 slutförts och Task 6 pågår. Task 4 behandlade numerisk modellering av True-1 experimenten; Task 6 behandlar uppskalning av transport till tids- och rumsskalor relevanta för säkerhetsanalysens behov.

Modelleringen i Task 4 har utvärderats och det visade sig att de flesta modelleringsgrupperna utnyttjade likartad konceptualisering av retentionsprocesserna /19-99/. Alla grupper inkluderade matrisdiffusion och jämviktssorption som de dominerande mekanismerna vid modelleringen av experimentet. Prediktionerna uppvisar dock successivt större spridning i resultat för de mer starkt sorberande spårämnena (till exempel cesium). Kvarvarande osäkerheter i modellering och utvärdering av resultat bedöms främst bero på en ofullständig kunskap om flödesfältet vid experimentet.

Inom Task 6 har modelleringsresultat presenterats för de två inledande faserna. I dessa har transport modellerats i en enskild spricka (längdskala 10 meter) för experimentella tidsskalor och för tidsskalor relevanta för en säkerhetsanalys. Syftet med dessa två övningar har varit att utvärdera hur olika konceptualiseringar och modeller uppför sig då tidsskalan ökar. Slutliga resultat har ännu inte presenterats. I Task 6C har en spricknätverksmodell med tillhörande retentionsparametrisering tagits fram i en 200-meterskala för användning i de senare delarna av Task 6 /19-100/. Den metod som presenteras i denna rapport har även legat till grund för framtagningen av en strategi för modellering av transportegenskaper inom platsundersökningsprogrammet /19-101/.

Även inom EU-projektet Retrock har en utvärdering gjorts av hur retentionsmekanismer vid radionuklidtransport bör inkorporeras vid modellering inom säkerhetsanalys. Specifikt har ett antal öppna frågor och rekommendationer ställts samman. Slutrapporten förväntas bli klar under 2004; dock kan redan nu konstateras att de frågor och rekommendationer som presenteras i allt väsentligt täcks upp av aktiviteter inom geosfärsdelen av detta Fud-program.

Ett validitetsdokument för SKB:s kod för radionuklidtransport i geosfären, Farf31, har producerats /19-102/. Dokumentet diskuterar numerisk verifiering av koden, och konstaterar därefter beträffande validering att koden är lämplig för sina uttalade syften. Dessa syften är att inom säkerhetsanalys beräkna transporten av radionuklider i sprickigt berg, samt att erhålla korrekta resultat för den typ av problem som koden är ämnad för. En numerisk finit-volym-representation av Farf31 har även utvecklats /19-95/. Jämförande beräkningar mellan standard Farf31 och den numeriska Farf31 bekräftar att koderna ger samma resultat. Även detta innebär en verifiering av Farf31. Den numeriska Farf31 kan även användas för att studera mer komplexa förhållanden än de som är möjliga i standard Farf31. Till exempel kan effekterna av en heterogen matris eller andra initial- och randvillkor studeras. Standard Farf31 har även omformulerats så att transportmotståndet (F-faktor) från diskreta modeller kan användas direkt som indata.

Effekterna av att beskriva endimensionell advektiv/dispersiv transport i sprickor som i Farf31 har undersökts /19-54/. I den studien jämförs en Farf31-liknande lösning med en fullständig tvådimensionell lösning i simulerade sprickplan. Studien visar att effekten av den endimensionella approximationen är förhållandevis liten med avseende på till exempel det resulterande transportmotståndet.

Ett projekt har bedrivits för att få fram enkla mått på geosfärens retentionsförmåga, som även inkluderar naturlig variabilitet och/eller osäkerheter. I /19-104/ presenteras denna metodik applicerad på Äspö. Studien baseras på grundvattenflödesmodellering utförd i FracMan/PAWorks /19-57/. Denna typ av enkla mått på geosfärens retentionskapacitet kan användas för att jämföra alternativa förvarsvolymer inom en plats eller alternativa platser där kunskapen (osäkerheten) varierar mellan volymerna eller platserna.

Fältstudier

Experimenten inom Äspöprojekten True Block Scale, True Block Scale Continuation och True-1 Continuation har pågått under de senaste tre åren. Dessa experiment visar tydligt att retention av spårämnen kan observeras i resultat från spår försök utförda i fält. Specifikt har även diffusion in i stagnanta (immobila) zoner kunnat fastställas. Den exakta fördelningen av de olika typerna av immobila volymer har dock inte kunnat fastställas explicit, men en konceptuell modell har presenterats som innehåller och kvantifierar de förmodade immobila komponenterna /19-67/.

Porositetsvariationen i den omvandlade zonen i sprickväggen och vidare in i det intakta berget har studerats under laborieförhållanden med PMMA-teknik /19-68, 19-105/. En porositetsgradient från sprickytan med avtagande porositet in i matrisen har observerats även om fenomenet inte kunnat kvantifieras i statistiska termer. Motsvarande mätningar har även gjorts på breccia bitar (längdskala centimeter) och bitar av brecciafragment (längdskala millimeter); även här kan en gradient noteras i de större bitarna. Kvantitativa porositetsbestämningar av finkorniga sprickfyllnadsmaterial (fault gouge) med förhöjt lerinnehåll har inte gjorts, men förhoppningen är att denna typ av resultat kommer fram i True-1 Continuation där en karakterisering av sprickzoner ingår som en viktig komponent. Både kvalitativ information för geometrisk conceptualisering samt kvantitativa data i termer av porositetsvariation förväntas komma fram.

Sorptionsegenskaper har fastställts (beräknats) för intakt bergmaterial genom att utnyttja känd mineralogi, CEC-värden (Cation Exchange Capacity), selektivitetskoefficienter och förekommande vattenkemi. Metodens användbarhet verifieras för närvarande genom laborieförsök där motsvarande sorptionsegenskaper (K_d -värden) mäts på omvandlat material samt finkorniga sprickfyllnadsmaterial (fault gouge).

Verktyg för numerisk modellering har utvecklats och använts för att visa hur grundvattenflöde och retentionsprocesser påverkar transporten av spårämnen vid spår försök utförda i fält över längdskalor upp till cirka 100 meter /19-66, 19-67/. Dessa resultat visar tydligt att olika modellverktyg, från enkla endimensionella koder med tyngdpunkt på beskrivningen av retention, till

mer komplexa tredimensionella koder med tyngdpunkt på den geologiska och hydrogeologiska beskrivningen, har utnyttjats för att beskriva de utförda experimenten. Den konceptuella utveckling som skett har även inkorporerats i den planerade strategin för transportmodellering inom platsundersökningsprogrammet /19-101/.

Resultat från True Block Scale har även utnyttjats för att ta fram den geologiska struktur- och retentionsmodell som används i Task 6 inom Äspö Task Force, se under rubriken Modellstudier ovan.

Program

Modellstudier

Inom den internationella arbetsgruppen Äspö Task Force fortsätter Task 6 med modelleringsövningar i ett spricknätverk på blockskala (200 meter). Både experimentella tidsskalor och tidsskalor relevanta för säkerhetsanalysens behov kommer att analyseras. Det huvudsakliga syftet med Task 6 är att studera hur modeller som konditionerats utifrån data från fältundersökningar (i begränsad skala) predikterar transport vid extrapolation i både tid och rum. Förutom att övningen ger indikationer på hur olika modellkoncept fungerar vid extrapolation ger övningen även svar på vilken typ av undersökningsdata som är användbara och utslagsgivande vid modellering.

Inom det pågående säkerhetsanalysprojektet SR-Can utvecklas viss metodik för radionuklidtransport inom integrerad modellering för säkerhetsanalys. För denna utveckling refereras till planeringsrapporten /19-44/. Specifikt för transport i geosfären kan här nämnas utveckling av metodologi för att analysera flöde och transport genom återfyllda tunnlar, samt transportberäkningar där detaljerad information från diskreta spricknätverksmodeller rörande sprickor och flöden i kapselskala förs över till koderna för nuklidtransport i när- och fjärrområdet.

Fältstudier

Både True Block Scale Continuation samt True-1 Continuation fortsätter under delar av kommande period. Dessa projekt utgör tillsammans en plattform där insamlade data från laboratorium och fält utnyttjas för att utvärdera konceptuella och numeriska modeller för radionuklidtransport.

Pågående fas av Äspöprojektet True Block Scale Continuation (BS2B) innehåller prediktioner och utvärderingar av spårämnesförsök i en intermediär struktur över avstånd upp till 30 meter där prediktion på basis av geologisk information betonas. Ett ytterligare mål är att analysera hur bakgrundssprickor i spricknätverket aktiveras vid spårämnesförsök. I den numeriska modelleringen inkluderas sprickheterogenitet i mikroskala i analysen liksom variabilitet i retentionsegenskaper vinkelrätt sprickplanet (det vill säga variabilitet i riktningen för matrisdiffusion).

I Äspöprojektet True-1 Continuation kommer ytterligare laboratorieundersökningar av sorption att utföras. Specifikt är syftet att analysera sorptionsegenskaper för finkorniga sprickfyllnads-material (fault gouge) och material i den omvandlade zonen närmast sprickan. Bättre förståelse för dessa materials sorptionsegenskaper är viktigt för att kunna prediktera spårämnesförsök i fält.

20 Biosfär

I Fud-program 2001 beskrevs SKB:s biosfärsprogram för de kommande sex åren. Efter knappt halva tiden kan det konstateras att programmet i stort sett genomförts programenligt och att satsningarna givit önskat resultat. Drygt 40 rapporter, tio artiklar i internationella vetenskapliga tidskrifter samt två doktorsavhandlingar och två licentiatavhandlingar har publicerats under perioden. Den uttalade ambitionen i Fud 2001 med bland annat utökad publicering i internationella tidskrifter har infriats.

Under perioden har ett unikt platsundersökningsprogram för biosfären startats och en ny organisation för att undersöka platser skapats. Forskningsprogrammet har deltagit med resurser, experter och utveckling av metoder för att möjliggöra detta. Under perioden har också ett genombrott skett genom utvecklingen av nya moderna verktyg för biosfärsmodellering inom säkerhetsanalysen. SKB är därmed rustat för att genomföra säkerhetsanalyser med effektiva hjälpmedel och relevanta data.

Den kommande perioden kommer att karakteriseras av omfattande insatser när det gäller analys av platsspecifika data samt flera stora säkerhetsanalyser. Den långsiktiga biosfärsforskningen är väl anpassad för att kunna bidra med metodik och data för dessa uppgifter, men även förberedd att genomföra riktade forskningsinsatser för att lösa nya problem som kan uppträda.

Intresset hos svenska och internationella forskargrupper, som arbetar med radioekologi och miljöproblem, kommer under den närmaste perioden troligen att öka allteftersom nya rön och metoder publiceras av SKB. Det kommer både att stimulera diskussionen, men också behovet att fortsatt publicera och framföra resultaten i internationella fora.

20.1 Tillståndet i biosfären

De ytnära ekosystemen eller biosfären är den del av jorden där de flesta organismer, djur, växter och människor lever. I biosfären uppkommer konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från djupförvaret i form av dos till människa och andra organismer. Beräkningar av omsättningen av radionuklider i biosfären och de doskonsekvenser detta leder till är därför en viktig del av en säkerhetsanalys. De beräknade konsekvenserna används dels för att visa huruvida myndigheternas krav på säkerhet och gränsvärden som uttryckts i doser är uppfyllda, dels för att jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller lokaliseringar. Trovärdiga beräkningar kräver att händelser och processer i biosfären beskrivs på ett realistiskt sätt med motiveringar till varför vissa processer är betydelsefulla och varför andra kan uteslutas. Tillstånden i de ytnära ekosystemen utgör också kemiska (salthalt, syrehalt), hydrologiska (vattenbalans) och geologiska (strandlinjeförskjutning) randvillkor för processer i geosfären. Dessa villkor är klimatberoende.

Vid platsundersökningarna och en senare lokalisering av djupförvaret för använt kärnbränsle måste hänsyn tas till hur aktiviteterna direkt påverkar de ytnära ekosystemen. Biosfären kommer också att ingå i en eventuell övervakning av förvarsområdet och under övervakningsperioden förväntas de ytnära ekosystemen förändras naturligt. För att kunna särskilja naturliga förändringar från eventuella effekter från ett förvar krävs goda kunskaper om ursprungstillståndet samt en kontinuerlig uppföljning av pågående naturliga förändringar. Allt detta ställer krav på tidiga och grundliga undersökningar av biosfären på en möjlig förvarsplats.

Det övergripande målet med biosfärsprogrammet är att med en modern vetenskaplig kunskapsbas beskriva de från radiologisk synpunkt viktigaste processerna i biosfären, samt att ge ett tillräckligt vetenskapligt stöd för att bedöma miljökonsekvenser av konstruktion och drift av ett förvar.

20.2 Granskningen av Fud 2001

Här följer de viktigaste kommentarerna från olika granskare till biosfärsprogrammet i Fud 2001. Generella kommentarer på Fud 2001 bemöts direkt nedan, specifika synpunkter kommenteras i den följande programbeskrivningen. Under våren 2004 redovisas myndigheternas granskning och beslut angående den förnyade säkerhetsanalysen av SFR, projekt Safe. Synpunkter kommer att om möjligt arbetas in i forskningsprogrammet för den kommande sexårsperioden.

Vid granskningen av biosfärsprogrammet i Fud 2001 gav samtliga myndigheter (SKI, SSI och Kasam) en sammanfattande bedömning att programmet var både metodiskt och ambitiöst upplagt. Vidare ansåg man att ambitionen att publicera i internationell litteratur var positiv. Både SSI och SKI önskade mer konkreta planer när det gäller hur övergången mellan biosfär och geosfär ska hanteras av SKB, speciellt med avseende på platsundersökningar. Kasam gav liknande synpunkter när det gäller kopplingen mellan recipienter och geohydrologin. I avsnitt 20.4 och 20.5 samt kapitel 19 redovisas nyvunna erfarenheter samt kommande program.

SSI och Kasam är positiva till det systemekologiska angreppssättet och föreslagna typ-ekosystem, men saknar beskrivningar av hur olika system kopplas ihop samt en plan för utvecklingen och samordningen i samband med platsundersökningarna. I planeringsrapporten för SR-Can /20-1/ samt i strategirapporten för platsbeskrivningens modellering av biosfären /20-2/ beskrivs detta. I dessa dokument framgår det att modellutvecklingen sker parallellt med platsundersökningarna, eftersom utvecklingen av modeller är beroende av förståelse och data från platserna.

SSI är positiv till beskrivningen av biosfärsprocesserna men önskar en mera omfattande dokumentation samt att Fud-rapporten skrivs i processform också för biosfären. Avsikten har varit att uppfylla det målet med denna Fud-rapport. Eftersom det finns många processer i biosfären och de ingår i många vetenskapliga discipliner (geologi, kemi, hydrologi, meteorologi, oceanografi, ekologi med flera) har det varit svårt att finna tillgängliga experter som behärskar och har tid att göra en ämnesövergripande syntes. Det är också tveksamt om granskningen av biosfärprogrammet underlättas av om den är i processform eftersom processbeskrivningarna skär tvärs igenom disciplinerna. Ambitionen kvarstår dock att skriva en processrapport till SR-Can och nästa Fud-rapport.

SSI är positiva till att SKB deltog i Fasset, men saknade program hur resultaten skulle användas i säkerhetsanalysen och platsundersökningarna. När Fud-program 2001 skrevs fanns inga resultat framme från Fasset och därför var det inte lätt att beskriva hur de skulle användas. När det gäller platsundersökningar kommer redan insamlade data att vida överstiga de behov som Fasset angett. I avsnitt 20.10 beskrivs SKB:s fortsatta program för miljön.

SKI uttrycker tillfredsställelse med att arbetet med inventeringar och kontrollprogram inom platsundersökningarna har startats. SSI vill att framtida övervakningsprogram ska utredas. Detta har gjorts i SKB:s program för övervakning, se kapitel 12. I det sammanhanget önskar Kasam att indikatorer för biosfärens påverkan fastställs. Eftersom gränsen för den tillåtna mängden av radionuklider vida underskrider bakgrundsstrålningen är det inte troligt någon förändring av biosfären kommer att kunna vara mätbar.

SSI och Kasam vill att ackumulation och frisättning av radionuklider i havsbotten och sediment belyses särskilt, eftersom platserna är kustnära. I avsnitt 20.5 och 20.7 beskrivs närmare erhållna resultat och det planerade arbetet. SKI efterlyser fortsatt arbete med alternativa säkerhetsindikatorer och Kasam vill på liknande sätt att riskerna jämförs med andra risker. Detta arbete är nära knutet till MKB-arbetet och andra säkerhetsindikatorer är snarare en fråga för geosfärforskningsprogrammet. Enligt SSI:s föreskrifter /20-3/ ska dos till dagens biosfär vara ett jämförelsemått och detta är en bra indikator på hur förvarets barriärer fungerar under alla tidsperioder.

20.3 Förståelse och konceptuella modeller

Myndigheternas föreskrifter kräver av kommande säkerhetsanalyser dels en mer realistisk beskrivning av biosfären, dels en uppskattning av konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp för omgivande fauna och flora /20-3/. Platsundersökningarna gör biosfären konkret, vilket innebär att förenklingar av hur man betraktar biosfären måste vara giltiga för den aktuella platsen.

Utvecklingen av processbaserade modeller bedöms vara en framkomlig väg att demonstrera förståelse samtidigt som ett numeriskt resultat erhålls för säkerhetsanalysen, se avsnitt 20.4. Angreppssättet är systemekologiskt, där hänsyn tas till både biologiska och abiotiska processer i ekosystemen. Kunskapen om processerna finns inom många områden, till exempel i konceptuella och numeriska modeller för skogsbruket, inom studier av omsättningen av näringsämnen i sjöar och hav eller av omsättningen av miljögifter. Däremot har denna information sällan använts för studier av hur radionuklider omsätts. Det krävs också generaliseringar för de långa tidsperspektiv och varierande miljöer som kommer ifråga vid en säkerhetsanalys för ett djupförvar.

För att få en trovärdig beskrivning av biosfärens utveckling behöver de konceptuella modeller som används stå i samklang med den vetenskapliga uppfattningen inom radioekologi, men också inom ekologi, ekotoxikologi och miljövärd.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

SKB har påbörjat arbetet med att sammanställa processbeskrivningar på liknande sätt som för övriga förvarsdelar /20-4/. Arbetet är omfattande på grund av mångfalden processer i biosfären. Interaktionsmatriser har varit ett användbart redskap för att identifiera viktiga processer och för att definiera de parametrar och variabler som behöver bestämmas i platsundersökningarna /20-5/, se vidare avsnitt 20.11.

SKB har fortsatt att anpassa det systemekologiska synsättet för att beskriva omsättning av radionuklider i biosfären. Långsiktiga insatser med doktorander sker vid institutionen för Systemekologi vid Stockholms universitet, Limnologiska avdelningen vid Uppsala universitet samt vid Högskolan i Kalmar. Resultat från detta arbete presenteras vidare nedan inom respektive programområde.

Några övergripande arbeten som sammanställer aktuella radioekologiska kunskaper har publicerats. En genomgång av bioackumulationsfaktorer i akvatiska miljöer och en statistisk analys av samband mellan olika omvärldsfaktorer har gjorts /20-6/. En kunskapssammanställning av biosfärparametrar för radionukliderna i de senaste säkerhetsanalyserna har gjorts /20-7/ och utgör grunden till en radionuklidkatalog. I de internationella programmen Bioprota, Embras, IUR:s avfallsgrupp och EU-projektet Fasset samt Erica, se avsnitt 20.9, sammanställs kunskaper inom radioekologi samt om effekter på miljön.

Några internationella symposier har följts upp, Ecorad 2001, IUR-Setac i Antwerpen samt IUR-Andra i Nancy har gett värdefull information och goda kontakter för att fullfölja arbetet.

Program

Det långsiktiga stödet för kompetensutvecklingen fortsätter enligt ovan. Under kommande period kompletteras dokumentation till biosfärsmatrisen. Delmatriser kommer att skapas för de delprogram som beskrivs nedan. Processsammanställningen kommer att fortsätta, speciellt i det internationella samarbetet. I övrigt kommer de nyvetenskaperna i nedanstående delprogram (till exempel modellutveckling, transportprocesser, skogsekosystem, myrmark, sediment) att fångas upp.

20.4 Modellutveckling

SKB:s modelleringar av radionuklidspridning i biosfären i säkerhetsanalysen har genomförts med verktygen Biopath och Prism. Dessa har utvecklats av Studsvik med stöd från SKB sedan 1970-talet. Verktygen har utnyttjats för KBS-studierna, SFR, SKB 91, SR 97 och Safe och har successivt vidareutvecklats med bland annat insatser från SKB /20-8 till 20-11/. Modellerna representerar ett holistiskt synsätt, vilket på 1970-talet var banbrytande inom miljöområdet. Vid den tiden betraktades de också som avancerade numeriska redskap. Modellerna baserades på utsläpp runt kärnkraftverk och anpassades senare till ett tänkt djupförvar, men fortfarande antogs att utsläppet sker direkt i recipienten som ett årligt enhetsutsläpp. Modellkonceptet har i stort sett övertagits i de flesta modeller som hanterar radionuklidspridning i biosfären i andra länder till exempel /20-12, 20-13/. Konceptet baseras till stora delar på användandet av generiska överföringsfaktorer (eller transfer- och bioaccumulationsfaktorer) vilket förutsätter att systemet som modelleras befinner sig i jämvikt. Dessutom baseras överföringsfaktorerna i många fall på empiriska data utan en mekanistisk förklaringsgrund /20-14, 20-15/. Modellerna beskriver de vägar som berör människan och hennes föda medan andra delar av biosfären sällan berörs.

För säkerhetsanalyser där man överskattar doser till människan kan dessa förenklingar vara motiverade, men för förståelsen och motiveringen av förenklingarna är de otillräckliga. En noggrann validering av underlaget är dessutom svår när det saknas alternativa modeller och synsätt /20-16/.

I Fud 2001 anges att alternativa modeller behövs för att validera de antaganden som görs. Andra modeller behövs också för att kunna tillvarata platspecifik information om processer och tillstånd i ekosystemen. Dessutom behövs en mer realistisk beskrivning av biosfären för att möta de krav som ställs av myndigheterna på en analys av ett djupförvars framtida konsekvenser. För att uppskatta konsekvenserna för omgivande fauna och flora enligt föreskrifterna /20-13/ krävs modeller som baseras på radionuklidflödet i hela ekosystemet och inte enbart för specifika vägar som är kritiska för människan till exempel brunn eller komjolk.

Att använda processbaserade modeller är en framkomlig väg att lösa en del av dessa problem. Överföringen mellan reservoarer baseras på naturliga processer som fotosyntes, nedbrytning, födointag, metabolism, näringsbehov med mera. Dessa processer är kopplade och flödena drivs till största delen av massbalansen mellan fixeringen och nedbrytningen av organiskt material, vilket underhålls av andra flöden av organiska och oorganiska material (till exempel syre, koldioxid, vatten, näringsämnen). Till dessa flöden associeras proportionella flöden av radioaktiva ämnen. Modellerna är generella och kan användas för alla radionuklider. Även om data saknas för överföringsfaktorer kan goda uppskattningar göras av koncentrationen i olika reservoarer och organismer. En annan fördel är att modellerna är skalbara till olika plats- och klimatförhållanden. Flera av förhållandena är mätbara i fält och inte nuklidspecifika, till exempel avrinningsområdets geometri, solinstrålning, vattenbalans och ekosystemets sammansättning.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

I SR 97 indelades biosfären i rutor med storleken 250 x 250 meter som associerades till typekosystemen sjö, rinnande vatten, hav (skärgård och kust), myr, jordbruksmark och brunn. Biopath-modeller som beskrev de olika typekosystemen utvecklades /20-9, 20-18/. Fördelen med detta angreppssätt är att orsaker till variationen i dosuppskattningen kan separeras. Osäkerhetsanalyser och känslighetsanalyser visade att de biologiska processerna behöver

beskrivas bättre och att de fysikaliska parametrarna behöver mätas bättre /20-9, 20-11/. I SR 97 var dock den platsspecifika informationen begränsad, eftersom få biosfärsundersökningar har gjorts i de gamla typområdena.

Inom projekt Safe, säkerhetsanalysen för SFR, infördes en tidsberoende utveckling för olika typer av ekosystem /20-10/ och platsspecifika biosfärsdata. Undersökningar genomfördes för att få ett bättre dataunderlag /20-19/.

För Safe utvecklades nya modeller, som baseras på systemekologiska principer, för kustområdet /20-20, 20-21/. De beskriver flödet av kol-14 genom näringsväven och koncentrationen av kol-14 beräknas i olika reservoarer utan att använda koncentrationsfaktorer. Överföringen av radionuklider baseras enbart på mekanismer som födoingtag, fotosyntes och nedbrytning. Denna modell testades för andra radionuklider till exempel cesium. Resultaten är lovande och beskrivs i internationellt publicerade artiklar /20-22 till 20-24/ och ingår i Linda Kumblads doktorsavhandling /20-17/.

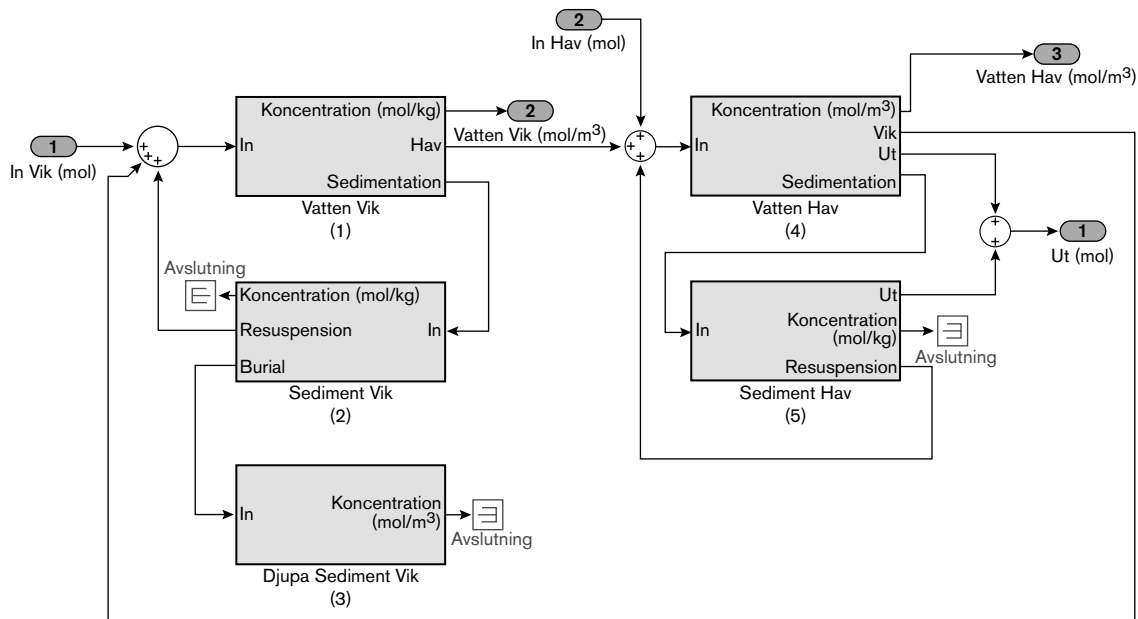
En liknande utveckling av systemekologiska modeller pågår för sjöar och håller på att testas för Eckarfjärden som ingår i Forsmarksområdet. Modellerna baseras på tidigare arbeten /20-25 till 20-27/.

Ett generellt systemekologiskt modelleringsverktyg, Ecopath, utvärderas 2004 som ett oberoende generellt modellverktyg för radionuklidtransport i näringskedjan /20-28/.

En översyn av beräkningsverktyg har påbörjats för att utvärdera potentialen för Biopath- och Prism-verktygen gentemot andra moderna modelleringsverktyg, både generella grafiska modelleringsprogram (till exempel Simulink/Matlab, Stella/Ithink, Powersim, Modelmaker, Madonna) och specifika program för säkerhetsanalyser Amber, Goldsim, Ecolego och Ecopath. Efter en översiktlig genomgång utsågs Simulink/Matlab ha den största potentialen och flexibiliteten för att framtida biosfärsanalyser. De probabilistiska simuleringarna hanteras i programmet @Risk kopplat till Matlab. De största fördelarna är beräkningskraften samt en öppen, välanvänd och transparent kod, vilket innebär att det finns många användare och alltså en bra bas för att verktyget uppdateras och underhålls. Fördelarna är också att systemekologiska modeller lätt kan implementeras i Simulink/Matlab /20-29/. Nackdelen är att verktygsbibliotek måste byggas upp för att ge en rationell arbetsmiljö för säkerhetsanalys. Under 2003 och 2004 utvecklades grundläggande verktygsbibliotek, Biomat och Tensit för att kunna hantera kompartmentmodeller och radionuklidkedjor samt förbättra hanteringen av data. Biomat-utvecklingen var ett samarbete med Posiva. Verktyget har testats med biosfärsmodellerna från SR 97 och internationella jämförelser (PSACoin) mot Biopath/Prism samt Amber /20-30/, se figur 20-1. Verktyget lovar gott och i SR-Can kommer det att användas för biosfärsberäkningarna. Även för andra delar av beräkningskedjan kommer verktyget att testas, se vidare avsnitt 18.3 och kapitel 14.

Program

De systemekologiska modellerna kommer att vidareutvecklas för sjö och land. Verktygslådan Tensit i Simulink/Matlab kommer att vidareutvecklas för att kunna ge en god miljö för säkerhetsanalyser och färdiga modeller för brunnar, dos till människa, bevattning samt mallar för sjö-, havs- och landekosystemen. Speciellt metoder för hur platsspecifika data ska användas kommer att studeras. Detta förutsätter en integration med Gis-databaser och andra numeriska verktyg som till exempel Femlab. Målet inför SR-Can är att ha en fullt fungerade simuleringsmiljö med Tensit.



Figur 20-1. Kustmodell från SR 97 konstruerad i Tensit. Den grafiska miljön för att konstruera modellen är snarlik en konceptuell formalisering av de viktigaste processerna och tillståndsvariablerna /20-30/.

20.5 Transportprocesser

Transportprocesserna avgör vilka ekosystem och organismer som kommer att utsättas för radionuklider samt hur stor utspädningen blir. Stora delar av detta hanteras med nuvarande modeller under förutsättningen att radionukliderna är lösta i vatten.

En andel av radionuklider i miljön kommer att vara bunden till partiklar, humuskomplex och organismer. Därför är transporten av radionuklider i biosfären i större utsträckning beroende av partikeltransporten. Partikeltransporten kan vara passiv som vid sedimentation och resuspension eller aktiv som vid transport via simmande organismer, födointag, handel med mera.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 beskrevs att vattenomsättningsmodellerna för kustvatten förbättrades i Safe-projektet /20-31, 20-32/, och att det finns en modell som täcker hela Östersjön och som ger randvillkor för de lokala kustmodellerna /20-31/.

I Fud 2001 påpekas att den ytnära hydrologin är viktig för att förstå vilka transportvägar, spridnings- och spädningprocesser som påverkar kontaminerat vatten sedan det lämnat berget. Flera kommentarer från myndigheterna har önskat fördjupade studier. Bland annat framhöll SSI i sin granskning att SKB, inför ansökningarnas säkerhetsanalyser, borde utveckla sin analys av radionuklidtransport i övergången mellan geosfär och biosfär. Kasam önskade se en fördjupning av förståelsen för de hydrologiska sambanden mellan ett djupförvar och olika ekosystem.

Se även avsnitt 20.2.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Vattenomsättningsmodellens känslighet för olika klimatförändringar (temperatur och isläggning), salthaltsförändringar samt en förändring av landhöjning utvärderades för Öregrundsgrepen /20-32/. Modellen har även använts av Naturvårdsverket och Finska

Meteorologiska Institutet för att studera vattenutbytet i kustvatten. Den är grundläggande för vattenutbytesberäkningar i Stockholms skärgård. Resultat och tillämpningar har publicerats i vetenskapliga tidskrifter /20-33, 20-34/. Vid platsundersökningarna och i analysarbetet kommer modellen att tillämpas efter kalibrering med plats-specifika mätningar samt förbättrade djupdata från havsvikarna vid platserna.

I Safe-projektet studerades vissa interaktioner i gränsskiktet mellan berg och ytvatten /20-35/. Detta har till exempel visat att utströmmande vatten ifrån berget i stor utsträckning späds med grundvattnet i avlagringarna cirka 100 gånger. Studien visade att det är möjligt att vattnet kan följa konduktiva lager i kvartära avlagringar för att strömma ut nära strandkanten. En uppföljning av denna studie gjordes med bättre upplösning på de yt-nära lagren /20-36/. Den bekräftar tidigare resultat att utströmning sker i anslutning till lågpunkter i terrängen, det vill säga företrädesvis sjöar, hav och våtmarker. Beroende på hydraulisk konduktivitet kommer vattnet att strömma genom bottenlagren eller mot strandkanten, se vidare avsnitt 19.2.11 och 19.2.12. Platsundersökningarna kommer att ge mera information hur den hydrauliska konduktiviteten varierar i sjö- och havsbotten vid platserna. Transporten av radionuklider kan också påverkas av diffusionen genom botten /20-37/.

Vid KTH gjordes yhydrologiska beräkningar för två sjöar i norra Uppland /20-38, 20-39/. Olika studier har gjorts att med enkla Gis-verktyg beräkna ytavrinningen i ett avrinningsområde, till exempel PC-raster /20-40/. Platsundersökningsprogrammet har identifierat flera viktiga hydrologiska studier och mätningar som bör genomföras för att underlätta biosfärsmodelleringen /20-5/. Dessa data kommer också att användas för att utveckla modellerna. Samordning sker med programmen för hydromodellering och hydrogeokemi, se avsnitt 19.2.11.

Preliminära resultat från modellstudier för att identifiera utströmningsområden från befintligt kartmaterial med hjälp av Gis visar att cirka 80 procent av områdena (våtmarker, sjöar, hav) kan identifieras med hjälp av morfometriska data (topografi, höjdskillnader, lutning, konvexa eller konkava ytor). Det betyder att det kan vara möjligt att förutsäga vilka ekosystem som utströmning sker till, utan att veta exakt var de är placerade i framtiden. I de systemekologiska modeller som utvecklas beskrivs flödet av partiklar (som organiskt material) i ett kustområde /20-20 till 20-22, 20-41, 20-42/. Från studierna av sediment /20-43 till 20-46/ kan nettotransporten av sedimentande material beräknas. Från platsundersökningarna erhålls flödes hastigheter och mängden av partikulärt material från de hydrologiska mätningarna och kemiprovtagningarna i ytvatten.

Program

De ovan beskrivna projekten kommer att fortsätta och sammanfattas till följande huvudområden:

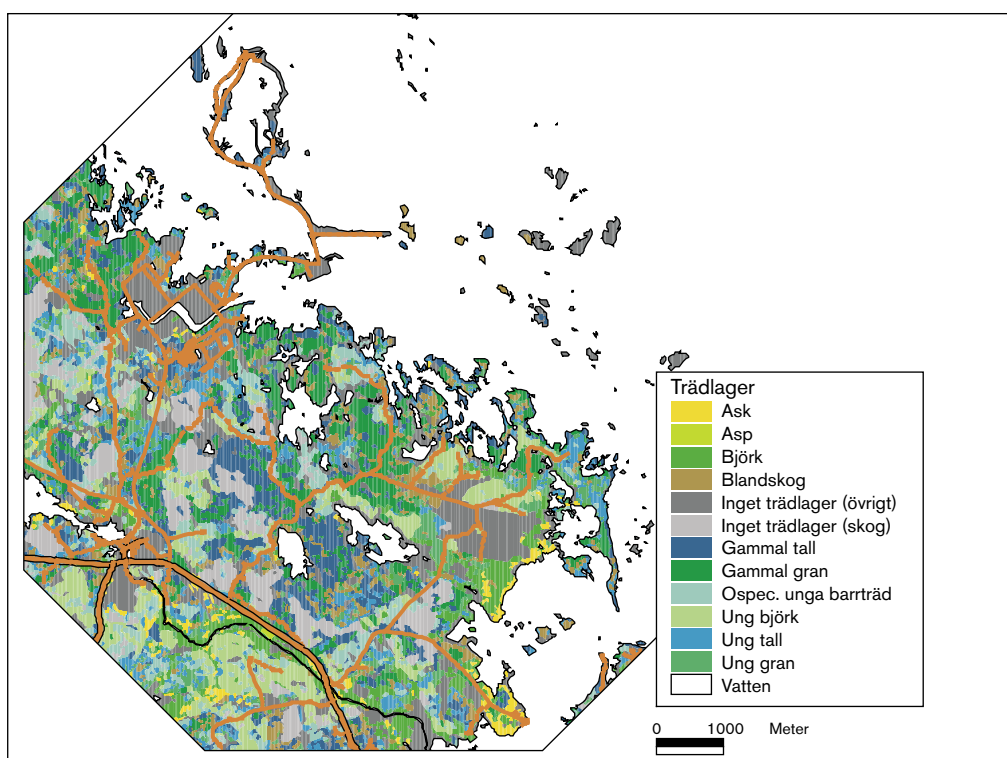
- Fördjupad yhydrologi med utvärdering av yhydrologisk modeller eller förenklade Gis-verktyg, till exempel Shetran topografiska index.
- Fördjupade modellstudier av ämnestransport vid utströmningspunkter från berget. Speciellt studeras hur ämnen rör sig närheten av sjö och havsbäcken.
- Fortsatta modell- och litteraturstudier av partikeltransport enligt ovan, kompletterat med fältdata från platsundersökningarna.
- En modell- och litteraturstudie av människans transporter under olika förhållanden som en avgränsning av hur stor population som kan beröras av ett kontaminerat område, vilket underlättar ställningstagande om representativiteten av den mest utsatta gruppen enligt SSI:s föreskrifter.

Insatsen ovan sker i samarbete med programmen för geokemi och hydrologi och är beroende av resultat från platsernas yhydrologiska mätningar.

20.6 Terrestra ekosystem

De terrestra ekosystemen, till exempel skog, jordbruksmark och myr, kännetecknas av att de normalt har en grundvattenyta som alltid eller mestadels av tiden ligger under markytan. Den dominerande transportprocessen från grundvattnet upp till dessa system är rotupptag, kapillärkraft och grundvattenytans nivåfluktuationer. Rotupptag och ackumulation i biomassa är dock de viktigaste processerna för transporter av radionuklider till människor och andra konsumenter. Myren och andra våtmarker är de sällfall där grundvattenytan under större delen av året fluktuerar runt markytans nivå, men för övrigt har likartade egenskaper som marker där grundvattenytan alltid ligger under marknivå. I detta avsnitt kommer generella markprocesser behandlas därefter skogen och våtmarker som specialfall.

Skogen är det dominerande ekosystemet vid de tilltänkta lokaliseringarna /20-47/ och kan vara en tänkbar recipient, se figur 20-2. Resultat från studier av utströmning av djupt grundvatten från försvarsdjup visar dock att få strömlinjer hamnar i skogen, se avsnitt 20.5. De flesta mynnar under vattendrag och i strandkanterna av sjöar och hav samt i våtmarker. Skogen har varit i fokus för flera projekt som bland annat studerat nedfallet från Tjernoby1, se vidare /20-48/. De flesta arbeten har i huvudsak gällt de kortsiktiga konsekvenserna av radionuklidtransporten. Få beräkningar har gjorts av spridning och ackumulation av nuklider från ett djupförvar i skog. Ett försök gjordes i skogarbetsgruppen i Biomass /20-49/. De viktigaste långsiktiga processerna är ackumulation av nuklider i jordprofilen och biologiska urlakningsprocesser som förflyttar nuklider till biota. Upptag av radionuklider från grundvattenytan in i rötterna och växtligheten är också viktig. Skogsfrågan är nära kopplad till den ytnära hydrologin och våtmarkernas utveckling. Det är framför allt skogar i sänkor, till exempel sumpskogar, som kommer att vara intressanta med avseende på effekter från ett djupförvar, och inte skogar i höjdlägen, till exempel hällmarkstallskogar.



Figur 20-2. Skogen i Forsmarksområdet efter satellitbildstolkning /20-47/.

Myrar och våtmarker är viktiga recipienter vid de tilltänkta lokaliseringarna. I SR 97 identifierades myrar som det typekosystem som ger den potentiellt högsta dosen till människan, för många radionuklider högre doser än de som kan fås från brunnar. Samtidigt var de antaganden som gjordes i SR 97 förenklade och troligen överskattningar. Dessutom krävs flera steg av förändringar av myrar, för att de ska ge en exponering till människor, till exempel utdikning, uppodling eller eldning av torv. Vidare konstaterades i SR 97 och i Safe att myrar är vanliga i många områden, de är en trolig utströmningspunkt från geosfären och ett troligt resultat av den naturliga framtida utvecklingen av biosfären efter landhöjningen i ett kustområde. Dessutom har det varit vanligt att dika ut våtmarker för att erhålla jordbruksmark i delar av norra Uppland /20-50/ och i Simpevarpsområdet. Därför är det viktigt att fördjupa kunskaperna om myrar och våtmarker samt studera viktiga processer som kan påverka radionuklidtransporter och potentiella exponeringsvägar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Primärproduktionen är ansamlingen av organiskt material som uppkommer med hjälp av fotosyntesen. För att den ska kunna växa till måste näringsämnen hämtas från transpirationsströmmen eller aktivt med hjälp av att utsöndra till exempel komplexbildare med mera för att lösa näringsämnen från mineralpartiklar, lerpartiklar. Radionuklider, som har liknande egenskaper som näringsämnen, kommer då att tas upp av växten. Näringsämnesupptaget står i proportion till tillväxten, vilket också gör att ett eventuellt radionuklidupptag som näringsämnesanalog, också måste vara proportionellt tillväxten. Massflödet av radionuklider i växter kan alltså modelleras med hjälp två variabler: tillväxt och transpiration. De två variablerna är skalbara till klimatförändringar samt vegetationstyp och är ett alternativt angreppssätt till de rotupptagsfaktorer som används inom radioekologi. Inom andra discipliner har liknande idéer nyligen tillämpats till exempel för radium och radonupptag i växter /20-51/.

För att kunna tillämpa detta alternativa angreppssätt krävs också en utveckling av modeller. En kraftfull modell som kan hantera transpiration, tillväxt och näringsupptag för vegetation har utvecklats av SLU och KTH, den så kallade Coupmodellen /20-52/. Coupmodellen eller dess föregångare Soil har med framgång använts av flera forskargrupper för att studera olika fenomen inom skogsbruket, jordbruket, hydrologi och klimat, se bibliografi i /20-52/. Fördelen med Coupmodellen är att den till stor del är baserad på processer, till exempel värmebalans, massflöde, transpiration, primärproduktion samt att den har en omfattande databas för parametrar som SLU samlat in under en lång period från olika delar av Sverige. På SKB:s uppdrag har modellen modifierats för att kunna inkludera transport av andra ämnen, till exempel radionuklider. För nuvarande pågår tester av Coupmodellen. Om de utfaller väl är tanken att modellen kommer att användas för all typ av mark, det vill säga skog, jordbruksmark och våtmark.

En sammanställning görs för närvarande vid Botaniska institutionen vid Stockholms universitet av hur olika ämnen via rottransport kommer in i växter /20-124/. Avsikten är att dela in ämnen i sådana som kan förväntas passivt följa med vattenströmmarna, sådana som aktivt hindras att komma in i växterna och de som aktivt tas upp och ackumuleras. Experimentellt arbete har också utförts i växthus med sälgs-kott vid Botaniska institutionen. Upptag av ett dussin stabila analoga element har korrelerats till sälgens transpiration och primärproduktion. Transpirationen är vattenflödet som passerar igenom växten, ämnen kan passivt följa denna vattenström in i växten, men avdunstningen gör att ämnena ansamlas i växterna. Vissa ämnen har växterna goda möjligheter att diskriminera till exempel uran, vilket betyder att de inte passivt följer med vattenströmmen utan ansamlas utanför roten.

Parallellt med arbetet med Coupmodellen har en sammanställning av befintliga radioekologiska modeller för skog påbörjats. Den kommer att resultera i en skogsmodell som använder befintlig metodik med upptagsfaktorer för att beräkna doser i skogsekosystem.

En fältstudie av hur olika ämnen ackumuleras i svampmycel har påbörjats av SLU i Forsmarksområdet. De kommer tillsammans med elementanalyser av jordmån och vegetation från platsundersökningarna ge värdefull kvantifiering av rotupptagsfaktorer för olika ämnen.

En viktig del för ökad förståelse av terrestra ekosystem är platsundersökningarna, de unika arbeten som producerat till exempel vegetationskartor /20-47, 20-53, 20-54/ och jordmånskartan /20-55/ är en bra utgångspunkt. Arbetet som SKB:s analysgrupp kommer att göra för att beskriva platsen /20-2/ är väsentlig för att både beskriva de dominerande processerna samt få data för modellerna. En vidare utveckling av satellitbildtolkningen av vegetationen har sammanställt och testat olika index för att kunna bestämma vegetationens produktion /20-56/.

Ett regelbundet utbyte av information genom möten och workshops om skogsekosystem har skett med Posiva. Posiva har ett omfattande forskningsprogram avseende vissa processer i skogen /20-57/.

I anslutning till Safe-projektet beskrevs utvecklingen från havsområde till sjö och sedan myr /20-45, 20-58 till 20-60/. Det har följts upp av senare arbeten där igenfyllnadsförloppet simuleras /20-43/ samt beskrivningen av sjöutvecklingen /20-44/.

En omfattande litteratursammanställning har gjorts där våtmarkers förekomst, ekologi, hydrologi och transportegenskaper sammanställs /20-61/. Den är grunden till en processbeskrivning för våtmarker.

Ytterligare information sammanställs nu för de drygt 400 borrhningarna i norra Uppland. Sammanställningen görs av de Limnologiska avdelningarna vid Uppsala universitet och Umeå universitet. Vid de kvartärgeologiska undersökningarna på platserna har våtmarker karterats och intressanta våtmarker som inte har grundvattenförbindelse upptäckts. Dessutom ger vegetationskartan /20-47/ värdefull information.

En genomgång av förutsättningarna för bevattning av grödor har gjorts och dosmodeller som använder bevattningen har uppdaterats /20-62/.

Program

Arbetet med att definiera och beskriva de dominerande processerna i terrestra ekosystem kommer att fortsätta. Coupmodellen kommer fortsatt utvärderas och en sammanhängande spridningsmodell för terrestra ekosystem kommer att utvecklas. Under perioden kommer också successionen och dynamiken i de terrestra systemen, till exempel betning, skörd och nedbrytning, att modelleras.

Platsundersökningarna kommer vara en viktig källa till förståelsen av ekosystemets processer förutom att ge viktiga data för modellerna. Det är framför allt kvantifieringen av olika processer som kommer att ge viktig information och stöd till modeller och antaganden. Även resultaten från de hydrologiska mätningarna och från de kemiska mätningarna av sammansättning i mark och biota kommer att vara betydelsefulla.

Följande aktiviteter har påbörjats eller planeras under den närmaste perioden:

- Studier av fördelning av biomassa, primärproduktion och kolets kretslopp i olika skogstyper, bland annat sumpskogar.
- Studier av historiskt och potentiellt utnyttjande av olika markslag på de aktuella platserna.
- Vidarutveckling av dagens våtmarksmodeller.
- Studier av myrars och våtmarkers hydrologi.

Data kommer huvudsakligen att produceras vid platsundersökningarna.

20.7 Akvatiska ekosystem

För de akvatiska ekosystem, det vill säga rinnande vatten, sjö och hav, är kunskaperna om de dominerande processerna för ämne-transport relativt goda /20-63/. Det viktigaste arbetet när det gäller dessa miljöer är att använda och utveckla modeller och modellverktyg som kan hantera kunskaperna och att samla in data från platserna för att parametrera modellerna. Modellutvecklingen och transportprocesser beskrivs i tidigare stycken och data från platsundersökningen beskrivs i avsnitt 20.11.

I många potentiella utströmningsområden kommer radionukliderna att passera ett sedimentlager. Därigenom kommer sedimenten i hav, floder och sjöar åtminstone potentiellt att utöva ett starkt inflytande på transporten av radionuklider till biota. Sedimentets genomsläplighet och adsorptionen påverkar spridnings- och spädningsmönstret. I gränsskiktet mellan sediment och vatten sker en markant förändring i redoxförhållanden, salthalt och biologisk aktivitet som kan påverka radionuklidflödet. Kortsiktigt kommer dessa processer troligen att minska utflödet och ge lägre doser. Långsiktigt kan däremot radionuklider ackumuleras och senare frisättas vid landhöjning, resuspension och dylikt, vilket kan ge förhöjda doser. Dessutom exponeras organismerna, som lever i sediment, för förhöjda halter som kan föras vidare i näringskedjorna till exempel via fisk till människan.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Ett projekt vid Limnologiska institutionen vid Uppsala universitet har studerat Eckarfjärden i Forsmark de senaste åren /20-26, 20-27, 20-64 till 20-66/. Många intressanta resultat visar hur de internationellt och nationellt sett ovanliga kalkoligotrofa sjöarna fungerar. En första systemekologisk modell över Eckarfjärden har konstruerats och resultat som berör radionuklidtransporten kommer att utvärderas. Arbetet har gett vägledning till hur övriga sjöar i området ska undersökas vid platsundersökningarna /20-67 till 20-69/, se nedan. Mätningarna av framför allt vattenkemi i platsundersökningsprogrammet /20-25/ har, förutom data till modellerna, gett värdefull information om processhastigheter och säsongsdynamik. Karteringen och karakteriseringen av sjöar i platsundersökningsprogrammet /20-70/ har dessutom gett ett perspektiv på hur vanligt förekommande dessa sjöar är. Limnologiska avdelningen har publicerat sina arbeten i internationella tidskrifter /20-65, 20-71/ under perioden och även spritt informationen till bland annat Naturvårdsverket /20-72/ och andra fora /20-73/.

I ett doktorandarbete vid Systemekologiska institutionen, Stockholms universitet, har de systemekologiska modellerna vidareutvecklats, se avsnitt 20.4 /20-17/. Fältstudier som rör betydelsen av bioturbation (omrörning orsakad av djur) i Östersjösediment och hur det påverkar radionuklidomsättningen har också genomförts /20-42/.

En databas med undersökningar och resultat från marina inventeringar av flora och fauna på grunda bottenar de senaste 30 åren har sammanställts /20-74/ för att kunna sätta platsspecifika data i relation till de nationella data. Arbetet kommer att kompletteras av en sammanställning av data från Kalmarsundsområdet. Platsundersökningarna i Oskarshamn har undersökt fauna och flora på bottenarna runt Simpevarpshalvön /20-75/.

I anslutning till Safe-projektet modellerades sedimentationsmiljön i norra Uppland från cirka 10 000 år bakåt i tiden till 5 000 år in i framtiden /20-76/. De styrande parametrarna var havets öppenhet, vilket anger vågerosionens kraft, samt landhöjningsprocessen som styr djupet och uppkomsten av skyddande öar och skärgårdar. Studien visade god överstämmelse med den kvartärgeologiska kartan av området. Senare kvartärgeologiska undersökningar har genom datering av erosiva faser ytterligare bekräftat modellföresägelserna /20-46/. Även igenfyllningsförloppet har simulerats /20-43/. Studien visar att också den minerogena sedimentationen i en

sjö till största delen kan förklaras av den biologiska produktionen. Det är framför allt kisel-skelett från kiselalger och kransalger som bidrar till detta. Platsundersökningarna har givit en hel del nya sedimentdata, dels från cirka 140 borrhningar inom Forsmarksområdet /20-77/, dels från de kvartärgeologiska undersökningarna /20-78/.

Ett äldre arbete som rör sedimentborrningar vid Äspö har rapporterats /20-79/ liksom ett intressant arbete från Kallrigafjärden i Forsmark, utfört i samband med en metodikkurs vid Stockholms universitet /20-80/. Vid den senare studien karterades havsbotten och omgivande marker med olika metoder och en karta ritades över hur en framtida Kallrigafjärd ser ut när den är torrlagd.

Ett arbete med att studera fördelningen av olika ämnen i sedimentprofiler från sjöar har startats för att kunna göra beräkningar av rörligheten av stabila analoger till radionuklider i sediment /20-44/.

Platsundersökningarna i de båda områdena har inneburit omfattande undersökningar i de akvatiska miljöerna, vilket förutom beskrivande data även kommer att ge viktig information om processer och processhastigheter.

Program

De påbörjade projekten ovan kommer att fortsätta.

Platsundersökningarna förväntas ge nödvändiga data över fördelningen av sediment och ackumulationshastigheter. Samarbete sker också med de hydrologiska, geokemiska och geologiska programmen och samordnas med insatser i myrmark och transportprocesser. Några viktiga områden där studier kommer att genomföras är:

- Modellering av spridningsprocesser under och genom sediment (pågående).
- Modellering av omlagring och ackumulation av sediment, kompletterat med fälldata.
- Modellering av ämne-transport genom sediment, alternativt genom strandzonen.
- Utveckling av en systemekologisk modell för sjöarna på platserna.
- Utveckling av en generell modell för radionuklidspridning i havsvikarna.
- Utveckling av en modell som beskriver sorptionsprocesser i mindre rinnande vattendrag.

20.8 Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt

Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Salthalten påverkar vilka ekosystem som kommer att dominera i Östersjön och radionuklidernas speciering. Dessa faktorer är också viktiga randvillkor för transportmodellerna i geosfären. Strandlinjeförskjutningen påverkar vilken biotop som är dominerande i ett område. Vattenomsättning, grundvattenbildning och ytavrinning är viktiga fysikaliska faktorer som påverkar dosen. Dessa faktorer är mycket variabla. Variationsvidden kan studeras med modeller av dagens förhållanden och en rekonstruktion av förhållanden sedan senaste istiden.

Strandlinjeförskjutningen i Skandinavien sedan istiden och en prognos för de närmaste 5 000 åren beskrivs i /20-81/ och för SR 97 studerades strandlinjeförskjutningen under flera glaciationsperioder /20-82/. Strandlinjeförskjutningen kan påverkas av en eventuell växthus-effekt, vilket förväntas ge en stigande havsytta. De närmaste 100 åren kan havsytans nivå komma att stiga cirka 0,4 meter /20-83/. Det innebär att strandlinjeförskjutningen avstannar under en tidsperiod, vilket även har uppmätts /20-84/. På längre sikt kommer en eventuell framtida glaciation återigen att binda vatten i glaciärer vilket ger en sänkning av havsnivån omkring 100 meter /20-82, 20-85, 20-86/. Samtidigt trycks jordskorpan ned av islasten upp till 800 meter i de centrala delarna och cirka 200–500 meter på de platser SKB undersöker /20-87/.

Detta påverkar utströmningsområden vid kusten, vilket återverkar på miljön runt djupförvaret. Det påverkar också salthalten i Östersjön samt biosfärens sammansättning.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Modellen som beskriver Östersjöns salthalt /20-88/ har vidareutvecklats till att förutsäga framtida salthalter i Östersjön beroende på olika klimatutvecklingar och strandlinjeförskjutningar /20-89/. Arbetet har också resulterat i internationella publikationer /20-90/.

Klimatet påverkar också grundvattenbildningen och vattenomsättningen i sjöar och vattendrag, vilket kan vara viktiga faktorer för flöden på förvarsnivå men också för vilken biosfär som kan förväntas. De största osäkerheterna gäller variationerna i nederbörden och avrinningen. Därför initierades ett projekt som studerar och daterar förekomsten av horisonter i torvmossor, vilka har en avvikande humifieringsgrad som anses bero på torrperioder /20-91 till 20-93/.

Ytterligare information om landhöjningsförloppet i Uppland har erhållits från sammanställningar av fältarbeten /20-46, 20-94/, se avsnitten 20.7 respektive 20.8.

Långtidsvariationer i klimat behandlas också i kapitel 21.

Program

Framför allt kommer klimatutvecklingen i Skandinavien under en mellanistid att studeras. Grundläggande frågor är hur nederbörden och avrinningen förändras. Vidare krävs mer information om processer och bildningshastigheter vid permafrost och hur detta påverkar de ytära ekosystemen. Delar av denna kunskap produceras i flera nationella och internationella projekt, bland annat när det gäller kortsiktiga klimatförändringar i Sweclim och långsiktiga i Bioclim. SKB planerar också projekt för den närmaste 1 000 åren och en mellanistid, se avsnitt 21.3.

Klimatfrågorna är nära kopplade till geosfärs- och geokemiprogrammet samt scenarioutvecklingen. Platsundersökningarna kommer också att producera data, framför allt när det gäller landhöjningsförloppet, men också när det gäller det lokala klimatet. De huvudfrågor som studeras i kommande forskningsprogram är:

- Klimatförändringar i Skandinavien under mellanistider i form av en sammanställning av information från genomförda studier.
- Kunskapsammanställning om permafrost och tundrans betydelse för radionuklidtransport i biosfären.
- Följa diskussionen om växthuseffekten.

20.9 Internationellt arbete samt informationsspridning

I det internationella arbetet inom bland annat IAEA, EU, IRPA, ICRP och NKS diskuteras standarder, metodik och lagstiftning. Dessutom presenteras nya rön inom strålningsbiologi, natur- och miljövård samt systemekologisk forskning som är av betydelse för biosfärsarbetet. Det är också viktigt att förmedla SKB:s kunskaper internationellt för att erhålla synpunkter och vetenskaplig granskning.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Det internationella projektet Biomass i IAEA:s regi avslutades hösten 2000 och producerade flera rapporter. SKB deltog aktivt i arbetet inom Tema 1 (förvar) och Tema 3 (skogs- och fruktgruppen) /20-49, 20-95, 20-96/. Även om Biomass huvudsyfte var att arbeta med radioekologiska frågor i anslutning till radioaktivt avfall, gav det endast begränsade nya kunskaper för SKB. Det vetenskapligt mest givande var resultaten från skogsarbetsgruppen.

SKB deltog i ett treårigt EU-projekt inom femte ramprogrammet, Fasset, som avslutades i november 2003. Avsikten med Fasset var att sammanställa kunskaperna om radiologiska effekter på miljön, det vill säga flora och fauna, och föreslå ett ramverk för hur sådana frågor kan hanteras av industri och myndigheter. 14 organisationer deltog i arbetet med representanter från strålskyddsmyndigheter och nationella strålskyddsforskningsorgan från flera länder. SSI var koordinatör för projektet. SKB deltog tillsammans med Systemekologiska institutionen, Stockholms universitet, i de arbetsgrupper som studerar spridningsmodeller i olika ekosystem, biologiska effekter samt själva ramverket. Resultaten från projektet Fasset har rapporterats av EU. Noterbara resultat är att en dosmodell skapats för olika geometrier av organismer, en litteraturdatabas Fred med effekter på organismer, samt nya idéer hur olika djurs exponering kan skalas efter djurens storlek. En mycket viktigt följd av Fasset är att andra internationella organisationer har stimulerats att engagera sig i effekter på miljön, till exempel IAEA, ICRP och IUR. Detta har också påverkat framstegen i nationella program, till exempel Environment Agency /20-97 till 20-99/, samt diskuterats på internationella möten, till exempel Ecorad 2001, IAEA Stockholmskonferens 2003, IUR Monaco, SPEIR 3 Darwin. Tyvärr har diskussionen varit begränsad när det gäller effekter på högre organisationsnivåer än individer, det vill säga populationer och ekosystem, vilka är de nivåer som oftast avses att skyddas. Dessutom har inte problem som berör eventuella utsläpp långt in i framtiden diskuterats, vilka är viktiga frågor för att kunna implementera kunskaperna för SKB. SKB deltar också i Erica, efterföljaren till Fasset i EU:s sjätte ramprogram.

SKB gav tillsammans med KSU stöd till ett projekt som syftade till att belysa ett förslag till förändrad syn på ICRP:s rekommendationer /20-100/ med exempel från svenska frågeställningar /20-101, 20-102/.

Hösten 2002 startades arbetsgruppen Bioprota. Ett tekniskt sekretariat finansieras av de deltagande organisationerna vilka är Andra, BNFL, Ciemat, Enresa, Nirex, Numo, Posiva och SKB. Andra organisationer som gör en insats i arbetet är till exempel Ecomatters, Studsvik Alexandria Sciences eller som har visat intresse för arbetet till exempel Nagra, Ondraf, US NRC och Ontario Power Generation. Syftet med Bioprota är att under olika teman bearbeta viktiga frågor för ett avfallsförvar. SKB är medlem i styrgruppen och deltar aktivt i att sammanställa en radionuklid-databas, utveckla bevattningsmodeller samt utarbeta protokoll för platsundersökningar.

SKB deltar också i Internationella RadioekologUnionens (IUR) arbetsgrupp om radioekologi och avfall.

Samarbetet med Posiva har utökats beträffande biosfären och ytnära ekosystem. Det är framför allt när det gäller utvecklingen av nya modelleringsverktyg, se avsnitt 20.4, men också när det gäller markekosystemen, se avsnitt 20.6.

Förutom ovanstående har SKB presenterat material om biosfärsarbetet vid flera symposier till exempel Ecorad 2001, SPEIR, NKS, IAEA, IUR /20-103 till 20-105/. Information om SKB:s biosfärsarbete sprids regelbundet med föreläsningar för ekotoxikologer och ekologer, samt med deltagande i olika ekologiska, hydrologiska och kvartärgeologiska seminarier och symposier.

Program

Förutom att följa och aktivt delta i de olika organisationernas diskussioner är målet att publicera erhållna resultat i internationella tidskrifter.

Följande huvudaktiviteter planeras:

- Aktivt arbete inom EU-projektet Erica.
- Aktivt deltagande i Bioprota och IUR:s arbetsgrupp om avfall.
- Fördjupa samarbetet med Posiva.
- Följa arbetet inom EU, NKS, ICRP och IRPA.
- Följa och presentera arbeten vid viktiga möten om strålningsbiologi, miljövård och systemekologi.
- Följa arbetet vid SKI och SSI samt bevaka lagstiftningen.
- Presentera arbetet inom biosfären för intresserade forskare och studenter.

20.10 Säkerhetsanalys

Programmet för forskning om biosfären som är beskrivet i tidigare stycken syftar till att ge ett underlag för att kunna genomföra säkerhetsanalyser med ett vetenskapligt underlag. En av de viktigaste insatserna är att uppnå tillräcklig förståelse för processer och fenomen för att kunna förenkla och göra numeriska modeller som behövs för dosberäkningar. Utöver detta ger forskningen information om generella data och osäkerheter i data som behövs som parametrar till modellerna och som komplement till platsdata, se avsnitt 20.11.

Under åren har redovisningen av biosfären i SKB:s säkerhetsanalyser utvecklats från en pessimistisk doskonverteringsfaktor för en brunn till en ökad realism med flera olika recipienter motsvarande olika typer av ekosystem. Myndigheternas krav har också ökat för biosfären.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

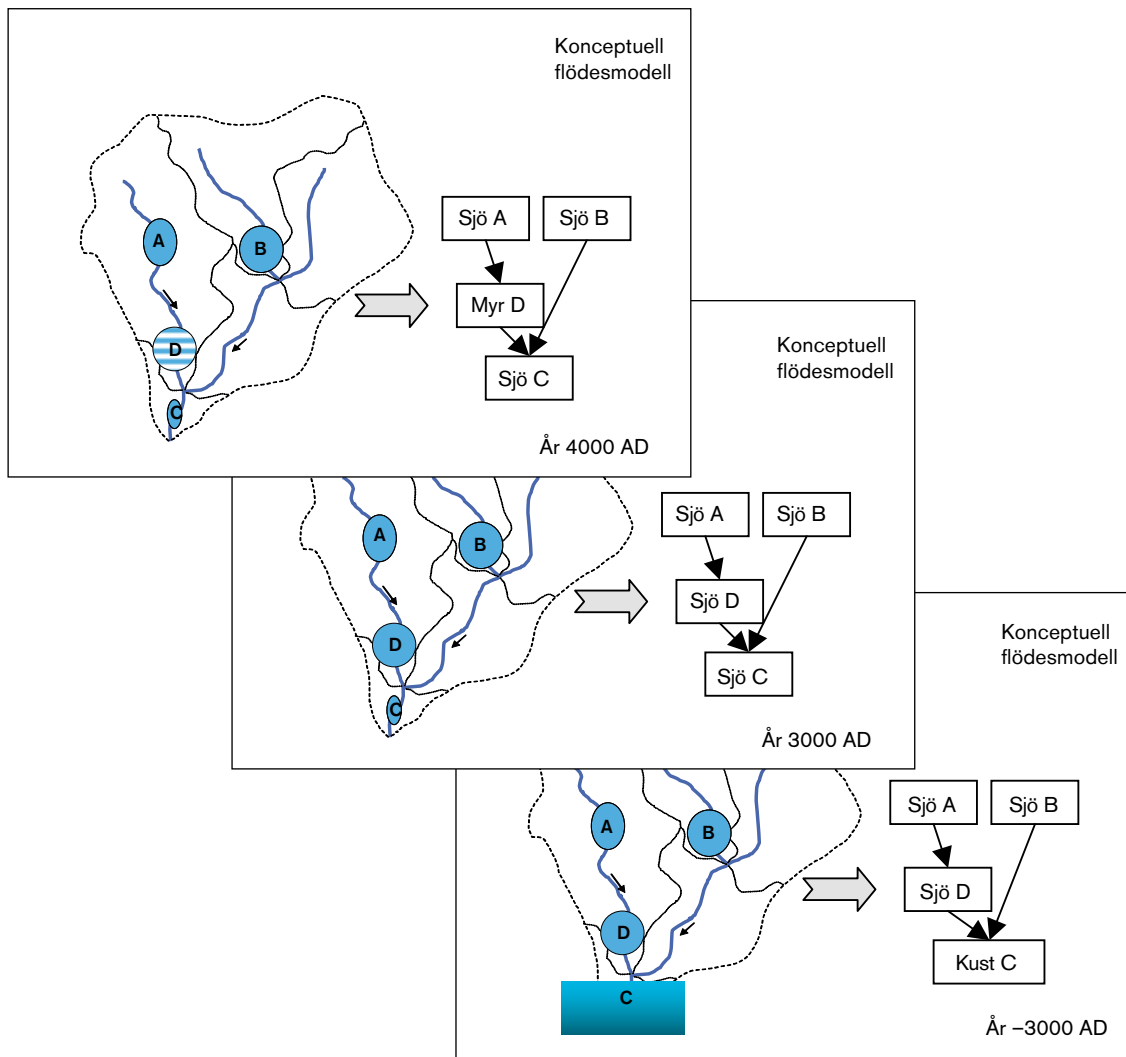
Den senaste säkerhetsanalysen av SFR, Safe, är den mest kompletta säkerhetsanalysen när det gäller biosfären och bedöms bli en god grund för kommande analyser. Myndigheternas granskning /20-106/ och beslut har nyligen redovisats för SKB under våren 2004 och tidigare har olika granskningsrapporter publicerats /20-107 till 20-112/. Granskningen och underlaget studeras för att kunna dra generella slutsatser om hur biosfären ska hanteras i kommande säkerhetsanalyser för att uppfylla myndigheternas krav och önskemål.

Planeringen av kommande säkerhetsanalyser (SR-Can och SR-Site) har gett nya insikter hur kommande säkerhetsanalyser ska genomföras /20-1/. Utvecklingsarbetet som behövs för att kunna genomföra analysen redovisas i avsnitt 20.4.

Arbetet med att hantera effekter på miljö påbörjades i EU-projektet Fasset, se avsnitt 20.9 och vid Systemekologiska institutionen vid Stockholms universitet och syftade till att sammanställa erfarenheter från ekotoxikologi och skydd av miljön från toxiska ämnen.

Program

Under kommande period kommer flera säkerhetsanalyser att genomföras och planeras. Därför kommer det huvudsakliga arbetet vara inriktat på att genomföra dessa och att komplettera eller förbättra dagens kunskaper eller metoder, se till exempel /20-1/ och /20-2/. Avsikten är att kunna hantera tidsberoende och kopplade ekosystem, se figur 20-3.



Figur 20-3. *Principiell illustration av hur ekosystemen kopplas ihop med hur ytvattnet rinner igenom dem vid olika tidpunkter under en mellanistid.*

En av de centrala frågorna är hur riskmättet ska tillämpas enligt SSI:s föreskrifter och hur verktygen och modellerna ska anpassas därefter. SKB avvaktar SSI:s kommande allmänna råd när det gäller den frågan. Verktygen behöver också utvecklas för att effektivt och flexibelt kunna hantera de nya processer som identifierats samt de platsspecifika data som kommer att produceras, se avsnitt 20.11. Planerade workshops kommer att vara viktiga moment för att samordna analysen av platsdata med analysen av förvarets långsiktiga säkerhet.

Metoder och kunskaper om konsekvenserna för miljön av radionuklider kommer att utvecklas i nära anknytning till de resultat som Fasset producerat och Erica kommer att producera. De systemekologiska modellerna, som SKB utvecklar, är väl lämpade för att beräkna koncentrationen i olika typer av biota.

20.11 Stödande forskning för platsundersökningsprogram

Konceptuella och kvantitativa osäkerheter i biosfären förorsakas till stor del av bristande tillgång och kvalitet på platsdata. För att stödja utvecklingen av dosmodeller samt ge platsspecifika data till säkerhetsanalyserna behöver data samlas in vid platsundersökningar. I ovanstående stycken har flera exempel givits. När det gäller biosfären har SKB, till skillnad från andra ämnesområden, historiskt en relativt liten erfarenhet av att samla in data vid fältundersökningar. Därför har metoder utvecklats samtidigt som tillgängliga kunskaper och resurser sammanställts. Målet är dock att huvuddelen av datainsamlingen sker inom SKB:s platsundersökningsorganisation. Platsundersökningsprogrammet innebär en av de mest omfattande datainsamlingar för samtidigt mätta parametrar som har utförts i Sverige för en avgränsad plats. I en rapport /20-5/ angavs variabler och parametrar som bedömdes vara viktiga att samla in vid en platsundersökning. En samordning har även gjorts med geosfärsprogrammet för att finna gemensamma behov av data för randvillkor, underlag för miljökonsekvensbeskrivningen, underlag för framtida övervakningsprogram samt åtgärder för att minska miljöstörning vid platsundersökning. Stor vikt har också lagts vid att identifiera påverkan mellan olika undersökningar.

Programmet för platsundersökningar framgår av /20-2, 20-5/, och de första sammanfattande resultaten kan hittas i version 1.1 som är den första platsbeskrivningen för respektive plats. Platsbeskrivningarna bygger på en rad underlagsrapporter som beskriver de olika delarna i ekosystemen, till exempel vegetation /20-47/, fauna, topografi, klimat, markanvändning och avlagringar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Se avsnitt 20.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Den största insatsen de senaste åren har varit att förmedla det databehov som säkerhetsanalysen har till platsundersökningsorganisationen, samt tillhandahålla experter inom olika områden för att planera och genomföra undersökningar i de ytnära ekosystemen /20-55, 20-69, 20-70, 20-78/. Stor vikt har lagts vid att planera och optimera platsundersökningarna och analysarbetet så att resultaten har tillräcklig hög kvalitet för att kunna utnyttjas för säkerhetsanalys, förståelse av processer och modellering /20-2/. För att effektivisera informationsutbytet mellan platsundersökningar, analysgruppen, säkerhetsanalys och forskning har en teknisk grupp, EKG, startats, och denna grupp träffas en gång i månaden.

Viktiga nya insikter som ökat förståelsen av processer och fördelningen av egenskaper i ekosystemen har beskrivits i ett antal rapporter. De akvatiska ekosystemen har undersökts och beskrivits /20-70, 20-75, 20-113/. Rapporterna beskriver dominerande funktionella grupper, deras utbredning och biomassa i hav och sjöar. Dessutom har de geometriska avgränsningarna, till exempel avrinningsområden och dess morfometriska parametrar beskrivits /20-70/. Abiotiska egenskaper i biosfären såsom hydrologi, meteorologi och avlagringar har rapporterats /20-25, 20-114 till 20-116/ respektive terrestra ekosystem /20-47, 20-53, 20-54, 20-55, 20-117 till 20-123/.

Program

Under den kommande perioden kommer forskningsinsatser främst att behövas för att stödja analysarbete av insamlade data, samt för att utföra mätningar av processhastigheter in-situ. Ett nära samarbete mellan forskningen, säkerhetsanalysen och platsundersökningarna är nödvändigt och informationsutbyte i form av workshops och möten kommer att utvecklas. Workshops planeras för att syntetisera information från platserna och bygga modeller som beskriver materialflödet och radionuklidflödet. I dagsläget har workshops planerats för de terrestra ekosystemen, gränskiktet mellan geosfär och biosfär, sjöar, hav, myr och människan.

21 Klimat

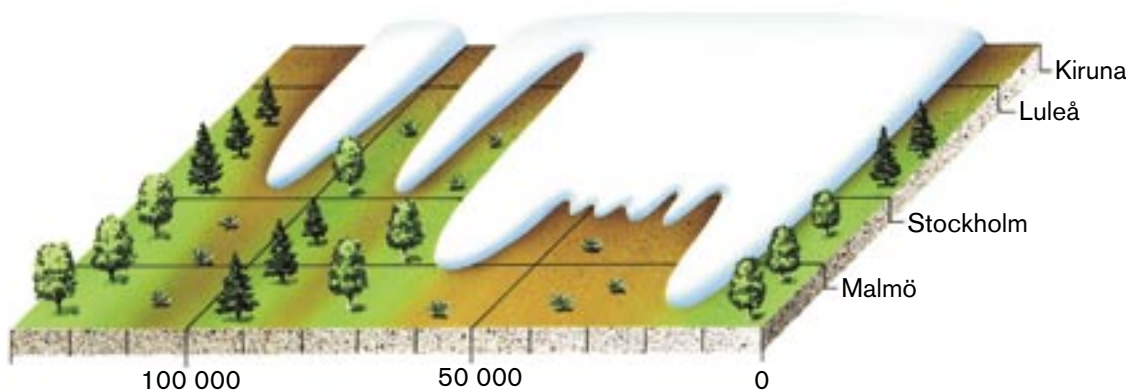
I det tidsperspektiv som funktion och säkerhet hos ett slutförvar för använt kärnbränsle studeras, det vill säga 100 000-tals år och ännu längre, har det skandinaviska klimatet karakteriserats av upprepade istider. De senaste cirka 800 000 åren har en utveckling med drygt 100 000 år långa perioder med ett successivt kallare klimat, *glacialer*, avbrutna av en snabb övergång till kortare perioder med ett varmt klimat liknade dagens, *interglacialer*, upprepats i ett cykliskt mönster. Under de glaciala perioderna, som består av varmare och kallare faser, har inlandsisar vuxit till, delvis dragit sig tillbaka och vuxit till igen för att mot slutet av perioden nå en maximal utbredning, se figur 21-1.

Under en glacial och de mellanliggande interglaciala perioderna kan, mot bakgrund av de processer som är av betydelse för ett djupförvars funktion och säkerhet, tre karakteristiska *klimatstyrda processtillstånd* identifieras. Klimatstyrda processtillstånd, i det följande benämnda *klimattillstånd*, definieras som av klimatet bestämda miljöer där ett antal karakteristiska förhållanden råder. De tre klimattillstånden är:

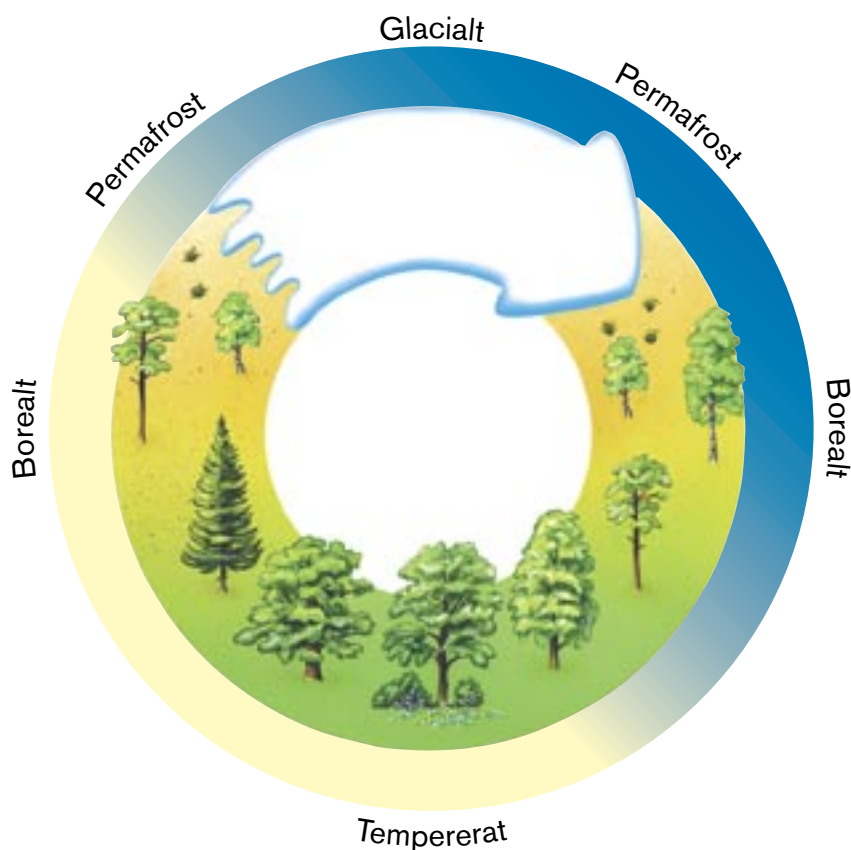
- Glacialt tillstånd.
- Permafrosttillstånd.
- Tempererat/borealt tillstånd.

Klimattillstånden omfattar en generell beskrivning av de karakteristiska förhållandena med tyngdpunkt på de processer som är av betydelse för djupförvarets funktion och säkerhet. Inom varje klimattillstånd kan extremer, som kan göras plats specifika, identifieras. Klimatets utveckling kan ses som en variation av klimattillståndens utbredning i tid och rum. De olika klimattillstånden avlöser successivt varandra i ett cykliskt mönster, se figur 21-2. På en viss plats behöver inte cykelns alla klimattillstånd genomlöpas så som figuren antyder. På en höglänt plats i sydöstra Sverige kan till exempel en period med permafrost direkt följas av tempererat/borealt tillstånd utan en mellanliggande period med glacialt tillstånd. Beroende på geografiskt läge är också perioderna med olika klimattillstånd olika långa.

Det är rimligt att anta att den klimatutveckling, med glacialer som avlöses av interglacialer, vi sett de senaste cirka 800 000 åren kommer att upprepas i framtiden. De senaste decennierna har människans påverkan på klimatet varit en omdebatterad, såväl natur- som samhällsvetenskaplig fråga. Det är framför allt människans utsläpp av växthusgaser som diskuterats. Det antas ge en uppvärmning av jordens klimat. Modellsimuleringar /21-1, 21-2/ visar att utsläppen av växthusgaser skulle kunna innebära att den period med varmt interglacialt klimat vi nu befinner oss i kan komma att bli mycket lång. Detta är ett annat tänkbart framtida scenario.



Figur 21-1. Schematisk skiss över utvecklingen under den senaste glaciala perioden – Weichsel.



Figur 21-2. Klimatrelaterade förändringar kan ses som en cyklisk utveckling med en successiv övergång mellan olika långa perioder då olika klimattillstånd råder.

Kunskapen om jordens klimatsystem är i dag inte tillräcklig för att förutsäga klimatet i de långa tidsperspektiv som är aktuella. Osäkerheterna runt varje presenterat klimatscenario, såväl istids- som växthusscenario, är stora. Baserat på dagens kunskaper är det dock möjligt att med relativt stor säkerhet beskriva inom vilka gränser det skandinaviska klimatet har varierat, och kan komma att variera, såväl i ett långt tidsperspektiv som med hänsyn till människans påverkan på klimatet. Om det kan visas att förvaret är säkert, givet de olika tänkbara klimattillstånden, har den faktiska utvecklingen mindre betydelse. SKB fokuserar därför sina forskningsinsatser inom klimatområdet på att identifiera och förstå de förhållanden och processer inom varje klimattillstånd som har betydelse för förvaret och dess säkerhet.

Vid studierna av klimattillstånden är det viktigt att inkludera tänkbara övergångar mellan olika klimattillstånd samt att utreda betydelsen av de olika tillståndens varaktighet. En viktig process i de sistnämnda sammanhangen är strandlinjeförskjutningen. Den orsakas framför allt av att inlandsisar byggs upp och smälter, det vill säga processer som tillhör det glaciala tillståndet, men är betydelsefull för förhållandena under såväl permafrost som under det tempererade/boreala klimattillståndet.

Inlandsisens utbredning är avgörande för rådande klimattillstånd. Simuleringar av den skandinaviska inlandsisen med hjälp av numerisk inlandsismodellering är därför ett nyckelprojekt i SKB:s program inom klimatområdet. En väl underbyggd beskrivning av den senaste glaciala perioden – Weichsel – är nödvändig för att tolka och förstå dagens förhållanden och för att studera flera av de klimatrelaterade processer som är av vikt för ett djupförvars funktion och säkerhet.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att aktiviteter inom klimatområdet bör ges hög prioritet. Man saknar i Fud 2001 en tydlig plan för hur SKB ämnar bedriva forskningen inom klimatområdet. Både SKI och SSI understryker strandlinjeförskjutningens betydelse mot bakgrund av att två kustnära områden studeras som möjliga platser för ett djupförvar. Man menar att det ställer stora krav på redovisningen av klimatpåverkan och biosfärens roll i säkerhetsredovisningen.

Myndigheterna anser också att växthuseffektens betydelse för klimatutvecklingen bör belysas närmare. Det gäller både dess eventuella betydelse i ett långt tidsperspektiv, det vill säga flera tusentals till tiotusentals år och ännu längre in i framtiden, och för utvecklingen de närmaste 1 000 åren. SSI påpekar vidare att de möjliga klimatvariationerna de närmaste 1 000 åren bör belysas särskilt. SKI anser att SKB, förutom att delta i internationella projekt, bör behandla de skandinaviska förhållandena i egna projekt.

SKB har inget att invända mot myndigheternas kommentarer.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Ett projekt som i första hand syftar till att utreda den skandinaviska inlandsisens bottenförhållanden och hydrologi inleddes 2002. Projektet omfattar samanställning av glacialgeologisk information, numerisk inlandsismodellering samt processtudier av inlandsisars hydrologi. Projektet och hittills vunnen kunskap redovisas närmare i avsnitt 21.1.

Empiriska studier av strandlinjeförskjutningen sedan den senaste inlandsisen drog sig tillbaka har avslutats /21-3/. Studien omfattar ett stort antal strandlinjekurvor från hela Skandinavien och även från Baltikum samt svenska sjöstjälpningsdata. Tack vare sjöstjälpningsdata har strandlinjeförskjutningens *isostaiska* (nedtryckning eller höjning av jordskorpan) och *eustatiska* (ändring av havsytan) komponenter kunnat särskiljas. Datamaterialet har anpassats till matematiska funktioner som ger en samlad beskrivning över landhöjnings- och strandförskjutningsförloppet över hela Skandinavien och nordöstra Europa. Funktionerna har lagts in i en Gis-applikation med möjligheter att producera detaljerade beskrivningar över specifika områden och/eller tidsperioder. Arkeologiska fynd visar god överensstämmelse med de beräknade strandlinjerna. Studien nämns vidare i avsnitt 21.1 och 21.3.

SKB har under perioden inte drivit några egna studier inom området jordens klimatsystem och klimatutveckling. Bland de projekt som följts kan kanske framför allt EU-projektet Bioclim nämnas /21-1, 21-2, 21-4/. Andra projekt SKB bedömt viktiga att följa är Sweclim /21-5/ och de publikationer som tas fram inom IPCC:s regi /21-6/.

Inom Bioclim /21-1, 21-2, 21-4/ har de långsiktiga konsekvenserna av utsläpp av koldioxid studerats. De antaganden och modeller som använts indikerar att höga koldioxidhalter i atmosfären kommer att bestå under lång tid, cirka 200 000 år. Det antas medföra att kvartärperiodens karakteristiska istider slås ut och en mycket lång period – upp mot 200 000 år – med temperade/boreala förhållanden kan förväntas i Sverige.

Program

Som redan nämnts är studier av den skandinaviska inlandsisen med hjälp av numerisk inlandsismodellering ett nyckelprojekt i SKB:s program. I ett första steg inriktas simuleringarna på Weichselglaciationen. En väl underbyggd beskrivning av Weichselperioden, där modellen kalibrerats och validerats mot omfattande och relevant geologisk information, är viktiga indata till studier av strandlinjeförskjutning, förekomst av postglaciala skalv samt studier av erosion och inlandsisens hydrologiska system. Beskrivningen ger också indata till studier av permafrost, både periglacial och subglacial. Projektet beskrivs även i avsnitt 21.1.

Strandlinjeförskjutning har en isostatisk och en eustasisk komponent. Processen måste studeras globalt, det kan göras med GIA-modeller (Global Isostatic Adjustment) /21-7, 21-8/. Ett projekt där GIA-modellering är en central del och vars syfte är att förstå och kvantifiera strandlinjeförskjutningen, givet olika isutbredningsscenarioer och jordmodeller, ska enligt planerna inledas 2004. Beskrivningarna av isutbredning och istjocklek under Weichsel, som tagits fram inom projektet "Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi" är viktiga som indata till modelleringen. Sammanställningen av strandlinjeförskjutningen sedan Weichsels slutskede /21-3/ kommer också att användas inom projektet.

En sammanställning av nordeuropeiska klimatarkiv, som täcker perioder längre än 10 000 år, har inletts och planeras bli klar 2004. Data kommer att jämföras med de klimatindata som använts vid modellering av isutbredningen under Weichsel. De kommer också, i kombination med isutbredning och strandlinjedata, att vara ett underlag för planerade studier av permafrost, se vidare avsnitt 21.2.

Klimatutvecklingen i Skandinavien under en mellanistid och de senaste 2 000 åren kommer att studeras i särskilda projekt. De beskrivs närmare i avsnitt 21.3.

Klimat och klimatrelaterade frågor behandlas även i avsnitt 20.8.

21.1 Glacialt tillstånd

En översikt över de processer som studeras inom det glaciala tillståndet ges i figuren 21-3. Figuren visar randen av en botten-smältande inlandsis. Isens bottenförhållanden och hydrologi är av största vikt för de termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska förhållandena såväl på ytan som i berggrunden och förvaret.

De frågor som är av speciellt intresse är:

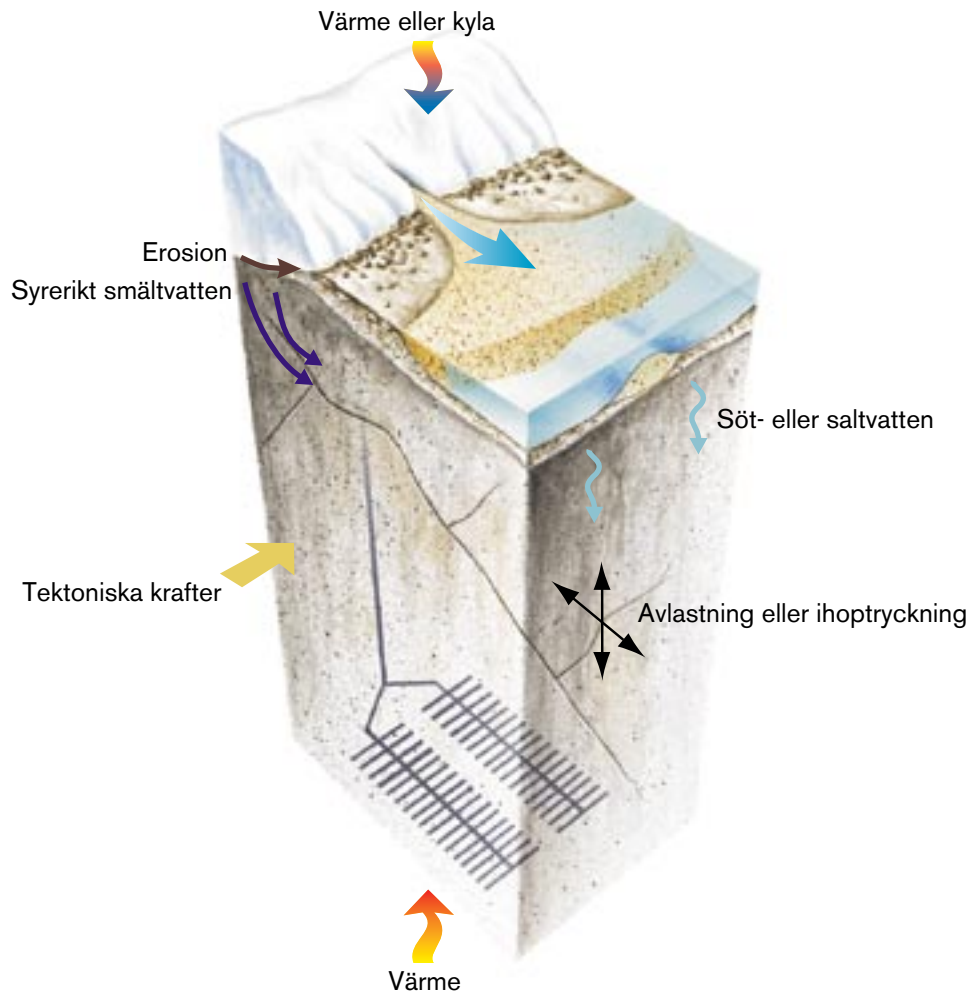
- Möjligt djup på subglacial permafrost.
- Förekommande vattentryck och vattenflöden.
- Möjlig nedträngning av glacialt smältvatten samt upptransport av djupa salta grundvatten.
- Förändringar av bergspänningar och benägenhet till bergrörelser.
- Kopplingar mellan hydrologiska och mekaniska processer.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Utöver de allmänna slutsatserna, som redovisats ovan, påpekar SKI att SKB bör utreda vad smältvattenproduktionen vid botten av en inlandsis betyder för hydrologi och grundvattensammansättning. SKB instämmer i detta och avser även utreda bottenförhållandenas och smältvattenproduktionens betydelse för de termiska och mekaniska förhållandena.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

Som ett delprojekt inom det ovan nämnda projektet "Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi" har omfattande geologisk information avsedd att användas som kalibrerings- och valideringsdata vid inlandsismodellering sammanställts. Exempel på data som sammanställts är israndlägen under Weichsel, förekomst av vittringsjordar, blockhav, veikkimoräner, moräntäckta åsar och jorddjup respektive kalt berg /21-9/. Sammanställningen omfattar även en kvalitativ värdering av informationen samt alternativa tolkningar i litteraturen. Syftet med sammanställningen är att identifiera och värdera israndlägen för att använda resultaten till att kalibrera inlandsismodellen, samt att identifiera områden där perioder av glaciationen dominerats av antingen bottenfrusna eller botten-smältande förhållanden, information som kommer att användas för validering av utdata från modellen.



Figur 21-3. I samband med att en inlandsis växer till och drar sig tillbaka förändras temperatur, hydrologiska förhållanden, bergspänningar och grundvattensammansättning.

Det geotermiska värmeflödet och dess variationer har tidigare bedömts ha en viktig inverkan på inlandsisars bottenförhållanden, framför allt på basala istemperaturer och smältvattenproduktionen /21-10 till 21-12/. Temperaturen och mängden vatten vid botten av isen påverkar sedan i sin tur hela inlandsisens dynamik. För att utreda vilket värde på geotermiskt värme flöde som bör användas vid inlandsismodellering över Skandinavien, samt effekten av att för första gången använda ett realistiskt dataset på geotermisk värme vid numerisk inlandsismodellering, har ett dataset som beskriver det geotermiska flödets rumsliga variation över Skandinavien sammanställts /21-13, 21-14/. Datasetet har använts för simuleringar av Weichselperioden med hjälp av en inlandsismodell utvecklad vid Universitetet i Maine bland annat i samarbete med Stockholms universitet /21-15 till 21-17/. De första resultaten visar att användandet av realistiska geotermiska data är betydelsefullt vid numerisk modellering av isens bottenförhållanden och smältvattenproduktionen i gränsskiktet mellan isen och dess underlag /21-14/.

Inom det internationella Decovalex/Benchpar-projektet har termohydromekaniska effekter av en inlandsis över en förvarsplats studerats med hjälp av olika numeriska modeller /21-18/. I projektet har data för Whiteshellområdet i Kanada använts, men resultaten kan i princip anses vara representativa även för svenska förhållanden. En viktig slutsats av genomförda modelleringar är att hydrauliska och mekaniska processer av betydelse för djupförvarets funktion och säkerhet är kopplade och att transienta effekter är betydelsefulla.

De hydromekaniska modelleringar som genomfördes /21-19/ gav bland annat följande resultat avseende förhållandena på djupet i bergmassan under inlandsisen:

- Då en bottenmältande inlandsis med betydande smältvattenproduktion expanderade över det studerade området ökade vattentrycket snabbt under de första 1 000 åren, i synnerhet inom konduktiva sprickzoner.
- Under samma period erhöles en hög horisontell hydraulisk gradient som delvis berodde av den sammanpressning av porsystemet som islasten gav.
- När inlandsisen helt täckte området, uppstod en stor nedåtriktad gradient.
- När isen sedan drog sig tillbaka, vände gradienten och blev uppåtriktad.
- Där den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan var mycket låg kunde residuala, höga vattentryck finnas kvar på djupet under lång tid.
- Eftersom islastens bidrag till spänningen till stor del kompensterades av höga vattentryck blev förändringen i effektivspänning relativt måttlig.

Strandlinjeförskjutning är framför allt ett resultat av glaciationer, dels direkt genom den isostatiska nedpressningen av skorpan på grund av isens tyngd, dels indirekt genom att eustasin påverkas av att havsvatten binds upp i eller frigörs från terrestra inlandsisar. Den empiriska modell över strandlinjeförskjutningen som refererades ovan /21-3/ ger en väl underbyggd bild av utvecklingen sedan den senaste inlandsisen drog sig tillbaka. Den ger ett gott stöd för att tolka dagens förhållanden och kan även användas för att beskriva utvecklingen den närmaste framtiden.

Program

Programmet är uppdelat i tre delprogram:

- Skandinaviska inlandsisar.
- Spänningstillstånd i jordskorpan.
- Strandlinjeförskjutning.

Skandinaviska inlandsisar

Projektet "Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi" inleddes 2002 och ska enligt planerna avslutas 2006/2007. En inlandsis bottenförhållanden, smältvattenproduktionen och de vattentryck och flöden den genererar är av central betydelse för de termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska förhållandena i förvaret. Projektet avser att ge en såväl rumsligt som tidsmässigt högupplöst bild av de basala förhållandena och det hydrologiska systemet under inlandsisar. Projektet omfattar både processer som verkar i inlandsisars hydrologi och de glaciologiska processer som styr hydrologins rumsliga och tidsmässiga variation. Det basala hydrologiska systemet hos inlandsisar består av följande två komponenter:

- Smältning av basal is bland annat genom tillförsel av deformationsvärme och geotermal värme.
- Smältvatten som förs ned från isytan, genererat av rådande klimat.

Basal smältning kan förekomma över mycket stora varmbottnade områden under långa tidsrymder. Variationerna i denna smältning, orsakade av isens allmänna dynamik, är relativt långsamma. Omfattande basal smältvattenproduktion kan förekomma under isströmmar, vanliga även under Weichselglaciationen. Ytsmältningen genererar avsevärt mycket mer vatten än det basala smältvattensystemet, men för ett betydligt mindre, frontnära, område. Variationerna i vattenproduktion från ytsmältningen är snabba. De kan vara kraftiga såväl under dygnet som med årstiden vilket ger stor variabilitet i såväl tryck som flöde. De båda systemen kan överlappa varandra i de frontnära delarna av inlandsisarna. Att etablera en modell som omfattar de båda hydrologiska systemen är ett av projektets mål.

Ett annat mål i projektet "Inlandsisars bottenförhållanden och hydrologi" är att beskriva den subglaciala hydrologin och subglaciala kanalers hydrologiska egenskaper och deras betydelse för tryck och flöden, samt att utreda hur de bildas. I studien kombineras numerisk modellering med fältstudier. Bland fältstudierna kan mätningar på Storglaciären nämnas /21-20, 21-21/. Möjligheter att utnyttja Grönlands inlandsis som en analogi utreds också. Även dagens skandinaviska glaciala landformer avslöjar mycket om de subglaciala förhållandena, i synnerhet under deglaciationen. En sammanställning över paleogeohydrologiska data inleddes 2003 och planeras bli klar under 2004. Dessa data ger, i kombination med resultat från inlandsis-modelleringen, möjlighet att bättre förstå den subglaciala hydrologin. Ett exempel på detta är samtolkning av åssträckningar och modellerade basala smältflöden, istjocklek och isrörelser.

Inlandsisen varierar mycket i storlek under en glaciation. Det betyder att även utbredningen av de områden som har bottenmältande förhållanden, och därmed aktiv subglacial hydrologi, kommer att variera i hög grad. Till dags dato har mycket lite gjorts för att utreda hur dessa tidsmässiga och rumsliga variationer sett ut under den senaste istiden. Därför är ytterligare ett mål i projektet är att, baserat på vår geologiska kunskap om den senaste istiden, ta fram en väl kalibrerad modellsimulering av Weichselisen. Med hjälp av förbättrade indata, kalibreringsdata och valideringsdata jämfört med tidigare studier, kommer användbar information om isens basala termala och hydrologiska egenskaper att erhållas.

Det välkalibrerade Weichselscenariot kan sedan även användas som utgångspunkt för att modellera tidigare inlandsisar och preliminärt deras basala förhållanden, samt för att studera konsekvenserna av extrema klimatförhållanden. Sådana experiment ger en bild av tänkbar spännvidd i förhållanden som kan tänkas uppstå.

Inlandsismodelleringarna är uppbyggda så att simuleringar i stor skala (till exempel nord-europeisk) kan ge indata till simuleringar i mindre skala. Det betyder att lokala förhållanden, såväl indata (till exempel topografi, geotermiskt flöde) som utdata (till exempel temperatur, basalt smältvatten) till inlandsismodellen, kan utvärderas platsspecifikt. Data som tas fram inom platsundersökningarna kan därmed samtidigt stödja inlandsisprojektet och tolkas mot bakgrund av projektets resultat.

Resultaten från inlandsismodelleringen lagras, tillsammans med geologiska in-, kalibrerings-, och valideringsdata, i en Gis-databas. Här görs även det huvudsakliga analysarbetet. Valfria data kan extraheras ur Gis-databasen för att användas inom andra projekt.

Spänningstillstånd i jordskorpan

Ett projekt, vars syfte är att förstå vilka mekanismer som ligger bakom postglaciala jordskalv inleddes under 2003 och planeras pågå i tre år. Projektet kommer att tillämpa finit-element-modellering. I ett inledande skede genomförs grundläggande studier med enkla jord- och ismodeller för att få en god förståelse för de fysikaliska sambanden och de mest betydelsefulla parametrarna. Eftersom postglaciala förkastningar på Nordkalotten är väl kända och kartlagda genomförs sedan en simulering av utvecklingen i detta område. Simuleringen kommer att använda sig av den ovan nämnda ismodellen och även inkludera portrycksvariationer varför isens bottenförhållanden är viktig även här. Känslighetsanalys och validering mot tillgängliga spännings- och landhöjningsdata kommer att genomföras. Som ett sista steg genomförs modellering för de båda kandidatplatserna baserad på då tillgänglig information om dem i syfte att indikera om, och i så fall var, postglaciala skalv kan komma att uppträda.

Strandlinjeförskjutning

För att kunna beskriva strandlinjens utveckling i tidsperspektivet glacial cykel och för olika scenarier planeras ett forskningsprojekt där GIA-modellering (Global Isostatic Adjustment) är en central del. Projektets mål är att identifiera de faktorer och processer som påverkar den skandinaviska kustlinjen i ett 100- till 100 000-årsperspektiv och att utveckla en isostatisk modell som omfattar dessa faktorer och processer. En sådan modell kan sedan användas för

att beskriva historiska och olika tänkbara framtida strandlinjer. Projektet ska använda den kalibrerade ismodell som beskrevs ovan. GIA-modelleringen kan också ge feedback till inlandsismodelleringen eftersom strandlinjens utveckling vittnar om vilken islast jordskorpan kan ha utsatts för.

21.2 Permafrost

Permafrost delas med hänsyn till sin mäktighet in i sporadisk, diskontinuerlig och kontinuerlig. Närvaron av permafrost, eller snarare av frusen mark, påverkar de hydrologiska förhållandena. Grundvattenbildningen antas minska och grundvattenflödet begränsas till ofrusna partier. Utfrysning påverkar grundvattensammansättningen.

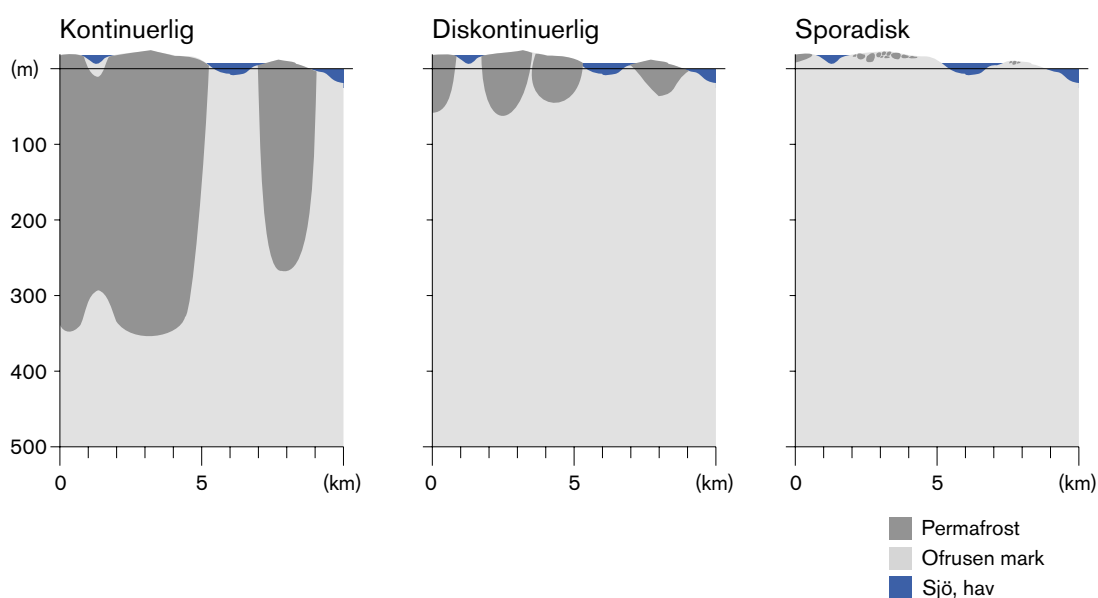
Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB konstaterar att kunskaperna om förekomst av permafrost i Skandinavien i ett långt tidsperspektiv är begränsade. Vidare bör de hydrologiska förhållandena och påverkan på grundvattensammansättning vid permafrost studeras närmare. SKI anser det positivt att SKB planerar en sammanhållen insats om permafrost.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

En litteraturstudie av permafrost med fokus på dess påverkan på hydrologi och förhållanden i berggrunden har genomförts /21-22/. Studien konstaterar att även om det finns viss information om permafrost på större djup från bland annat arktisk gruvindustri behandlar flertalet referenser ytnära processer. En viktig iakttagelse är att permafrost i allmänhet inte förekommer under stora sjöar och vattendrag. Vidare förekommer utfrysning av salt och hydrater i dagens permafrostområden. Man kan också konstatera att mekaniska effekter på grund av frysning begränsar sig till ytan eller ytnära påverkan.

En fältstudie av permafrost och dess betydelse för hydrologi och grundvattensammansättning genomförs tillsammans med Posiva, Nirex och OPG vid en guldgruva i Kanada, Lupin Mine. Studien omfattar utöver fältundersökningar även laboratorieförsök /21-23/. Resultaten kan framför allt användas för att visa hur permafrost kan påverka grundvattensammansättningen.



Figur 21-4. Illustration av sporadisk, diskontinuerlig och kontinuerlig permafrost.

Program

Tänkbart djup och utbredning av permafrost kommer enligt planerna att studeras med hjälp av en numerisk modell som utvecklats vid Helsingfors universitet /21-24/. Syftet med studien är att kartlägga i vilken omfattning permafrost och frusen mark kan tänkas förekomma på de båda platser SKB undersöker. Studien består av två delar. I den första identifieras de faktorer som kan påverka utvecklingen av permafrost. Exempel på sådana faktorer är: topografi, jordlager (material, djup), vattendrag (djup, utbredning, flöde och salthalt), grundvattensammansättning (salthalt), grundvattenflöde, värmeflöde (yta, geotermiskt) och temperaturklimat inklusive årliga variationer. I den andra delen studeras, mot bakgrund av uppnådda resultat, permafrost på de båda kandidatplatserna. I dessa studier inkluderas plats specifika parametrar av betydelse. Hur värmen från det deponerade bränslet kan påverka utvecklingen av permafrost kommer också att analyseras.

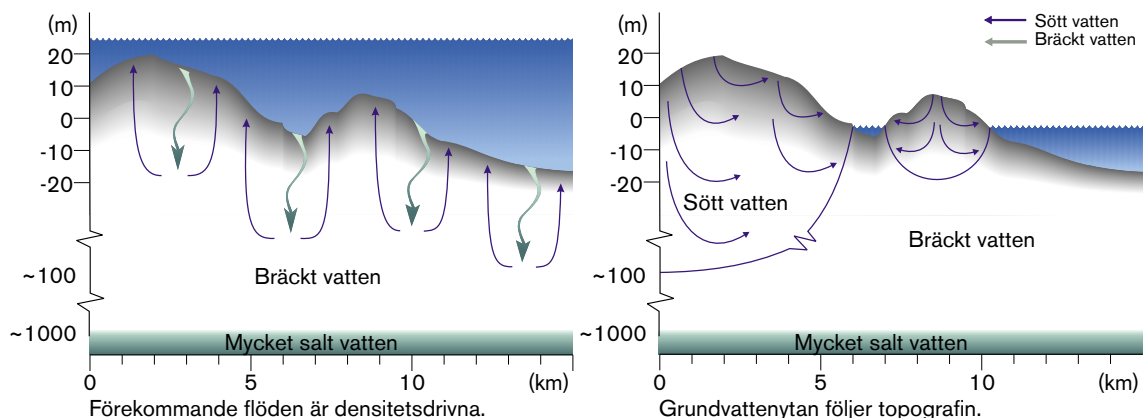
I ett första steg analyseras förekomst av periglacial permafrost, men även subglacial permafrost kommer att studeras. I de sistnämnda analyserna utgör information från det tidigare nämnda inlandsisprojektet viktigt indata. Resultat från simuleringar av permafrost kommer att användas i geohydrologiska och geokemiska analyser.

21.3 Tempererat/borealt tillstånd

Tempererat/borealt klimattillstånd råder, med undantag av delar av fjällkedjan, i hela Sverige i dag. Dagens variationer i nord-sydlig riktning, från nordligaste Sverige ned mot Mellaneuropa, bedöms täcka in amplituden av den variation man kan tänka sig inom landet och detta klimattillstånd även i ett långt tidsperspektiv.

Den process som bedöms ha störst betydelse för förhållandena i djupförvaret inom detta klimattillstånd är strandlinjeförskjutning. Konsekvenserna av strandlinjeförskjutning beskrivs schematiskt i figur 21-5. Strandlinjens läge påverkar de hydrologiska randvillkoren för djupförvaret. I figuren illustreras utvecklingen vid *regression*, det vill säga då ett vattentäckt område blir land. Vid *transgression*, det vill säga då ett landområde blir vattentäckt, är utvecklingen den motsatta.

Salthalten i det hav, det innanhav eller den sjö, som i olika skeden av en glaciation motsvaras av dagens Östersjö, påverkas av förbindelserna med världshaven. Dessa beror i sin tur av inlandsisens mäktighet och strandlinjens läge. Studier inom biosfärsprogrammet visar att sötvattentillrinningen är minst lika viktig för salthalten, se avsnitt 20.8. Inom biosfärsprogrammet har tänkbara variationer av salthalten beskrivits för olika tänkbara kombinationer av sötvattentillrinning och strandlinje.



Figur 21-5. Schematisk skiss som visar variationer av hydrologi och salthalt i samband med regression vid en hypotetisk plats vid dagens Östersjökust.

Kunskaperna om förhållanden och processer inom det tempererade/boreala klimattillståndet och deras betydelse för förvarets säkerhet och förhållanden i biosfären är goda.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Såväl SKI som SSI anser att i kustnära områden är strandlinjens framtida läge och dess betydelse för grundvattenförhållanden och biosfär en viktig fråga.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Som redan nämnts har empiriska studier av landhöjningsförloppet sedan den senaste deglaciationen avslutats /21-3/. Mer detaljerade studier av landhöjningsförloppet i Uppland har genomförts, se avsnitt 20.8. Kunskapen om de historiska förhållandena och möjligheterna att beskriva det isostatiska förloppet de närmaste 1 000 åren är därmed mycket goda. De beskrivningar av havsnivåförändringar som tagits fram inom IPCC /21-6/, ger tillsammans med ovan nämnda resultat information om strandlinjeförskjutningen de närmaste 1 000 åren som bedöms vara tillräcklig för säkerhetsanalysens behov.

Människans påverkan på klimatet är den process som framför andra studerats för att beskriva den framtida klimatutvecklingen. SKB har inte bedrivit några egna studier inom området. Publicerade resultat framför allt inom projekten Sweclim /21-5/ och Bioclim /21-1, 21-2, 21-4/ och genom IPCC bedöms vara tillräckliga för SKB:s tillämpningar.

Program

En sammanställning och syntes av klimatvariationerna i första hand inom Holocen, men även under tidigare skeden sedan den senaste deglaciationen, har sedan länge planerats. Studien är avsedd att belysa klimatvariationer under mellanistider samt tänkbara klimatförhållanden sydost om en inlandsis som delvis täcker landet. Studien ger också underlag för att sätta gränser inom vilka temperatur och nederbörd varierar under det tempererade/boreala tillståndet.

Ett projekt vars syfte är att beskriva och förstå orsakerna till de klimatvariationer vi kan se i Skandinavien de senaste 2 000 åren, samt att utvärdera hur information från klimatarkiv kan användas tillsammans med klimatmodeller för att beskriva klimatet, har startats. Detta projekt förväntas ge underlag för att beskriva klimatförändringar de närmaste 1 000 åren, även med hänsyn tagen till möjlig mänsklig påverkan på klimatet.

Det redan omnämnda GIA-projektet kommer att ge information om strandlinjen i olika skeden av en glacial cykel. Resultaten kan även användas för att simulera vad som skulle hända med strandlinjen i ett växthusscenario där mönstret med istider slås ut och dagens inlandsisar smälter.

Kunskaperna om förhållandena inom det tempererade/boreala tillståndet är goda. Modell-simuleringar inom Bioclim /21-2/ visar att en mycket lång period med varmt klimat liknande dagens skulle kunna vara en konsekvens av mänsklig påverkan på klimatet. Mot bakgrund av det planeras konsekvenserna av en mycket lång period med tempererade/boreala förhållanden utredas närmare, se även avsnitt 20.8.

22 Samhällsforskning

Till ansökningarna om att få bygga inkapslingsanläggningen respektive slutförvaret för använt kärnbränsle ska bifogas en miljökonsekvensbeskrivning – ett MKB-dokument. Detta ska innehålla beskrivningar av påverkan och effekter på grund av planerade anläggningar och verksamheter. MKB-dokumentet ska även innehålla beskrivningar av bedömda konsekvenser för miljö, natur, hälsa och samhälle. För att kunna presentera ett brett och fullständigt underlag om samhällsaspekter till ansökan om tillstånd avser SKB att bedriva och finansiera forskning inom det samhällsvetenskapliga området.

I de åtta förstudier som SKB genomförde 1993–2000 ägnades samhällsaspekterna ett betydande intresse /22-1 till 22-11/. 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 samhällsutvecklingen i kommunen och regionen, både med och utan en etablering av ett djupförvar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Samhällsvetenskap och den verksamhet som SKB sedan början av 1990-talet haft inom området togs inte upp i Fud 2001. I samband med granskningen framförde remissinstanserna synpunkter på hur samhällsfrågorna borde studeras, huvudsakligen beslutsprocesser, MKB och psykosociala frågor. Bland annat ville ett flertal kommuner, universitet och intresseorganisationer att Fud-programmets tekniska och naturvetenskapliga del skulle kompletteras med en samhällsvetenskaplig del med forskning om exempelvis attityder, beslutsfattande i komplicerade samhällsfrågor och samhällsutveckling på lång sikt. Detta har hela tiden varit SKB:s avsikt och planeringen inleddes i själva verket redan före Fud 2001 men redovisades aldrig i rapporten, eftersom programmet befann sig i ett mycket tidigt skede av kartläggning och planering.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Under 2003 har SKB, som en förberedelse för forskningsprogrammet, kartlagt den huvudsakliga forskningen med anknytning till avfallsfrågan som genomförts i Sverige samt den viktigaste internationella forskningen. Kartläggningen har sammanställts i en allmänt tillgänglig sökbar databas på 400 poster. De två forskningsseminarier som genomförts med forskare och berörda kommuner inom samhällsområdet under 2002 och 2003, har också varit en viktig del i SKB:s förberedande arbete.

Syftet med den samhällsvetenskapliga forskningen som SKB vill stödja ska vara 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 beslutsunderlag och MKB-dokument.
- 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.

Med dessa mål utkristalliserar sig fyra generella forskningsområden som är relevanta för avfallsfrågan och kommunerna:

- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter.
- Beslutsprocesser.

- Opinion och attityder – psykosociala effekter.
- Omvärldsförändringar.

Nedan ges en allmän beskrivning av de fyra utvalda forskningsområdena.

Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter

Syftet med forskningen inom området socioekonomisk påverkan är, att öka kunskapen och förståelsen för hur enskilda orters ekonomi och befolkningssammansättning påverkas av att en ny och stor anläggning eller verksamhet etableras på orten. Denna kunskap kan i sin tur lämna viktiga bidrag till SKB:s, de berörda kommunernas och andra intressenters bedömningar av hur etableringen av djupförvaret kan komma att påverka ortens ekonomi och befolkningsutveckling.

Med socioekonomisk påverkan avses både snävt ekonomiska aspekter, som sysselsättning, industrietablering, företagarganda, fastighetspriser, kommunal ekonomi och turism, och samhällsekonomiska effekter som resande till och från orten, in- och utflyttning till eller från orten liksom ortens renommé och attraktionskraft.

Beslutsprocesser

Lokaliseringen av djupförvaret är en kontroversiell fråga bland annat därför att det handlar om kärnteknisk verksamhet och att tidsperspektivet är omöjligt att överblicka och förstå. Frågan har kopplingar till både lokal samhällsplanering, nationell energipolitik och internationellt arbete. Genom att ta fasta på politiska frågor av denna speciella karaktär är syftet med forskningen, att lägga grunden för en generell kunskap om beslutsprocesser kring komplexa frågor. Denna kunskap kan i sin tur lämna väsentliga bidrag till genomförandet av samrådsförfarandet, utredningar, planeringsinsatser och beslutsfattande. Såväl SKB, de berörda kommunerna och andra intressenter, som kommuninvånarna, får därmed nytta av forskningen.

Hur beslutsprocessen kring en djupförvarsetablering faktiskt ser ut är en sak och hur den uppfattas är delvis en annan. Det finns en lång rad svenska och utländska studier av beslutsprocesser att dra lärdom av, till exempel i vad mån fattade beslut uppfattas som legitima, rättvisa och effektiva.

Opinion och attityder – psykosociala effekter

Opinioner och attityder är föränderliga fenomen och präglas av en lång rad olika drivkrafter liksom av personliga egenskaper. Som fenomen är de därför komplexa att utforska.

Etableringen av djupförvaret är dessutom en utdragen process, med olika aktörer i olika skeden. Syftet med detta forskningsområde är att utforska hur opinioner och attityder uppkommer och förändras under projektets olika skeden. Denna kunskap kan lämna väsentliga bidrag till förståelsen för de olika aktörernas beslutsfattande och till genomförande 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 för opinionsbildning och attityder. Det är därför också betydelsefullt att belysa "symboliken" kring djupförvaret och dess verksamhet.

Omvärldsförändringar

Etableringen av djupförvaret är ett unikt projekt med unika kännemärken. Till slut är det bara en ort i Sverige som kommer ifråga. Samtidigt är det en fråga som mycket tydligt hänger samman med omvärlden och förändringar i densamma. Syftet med forskningsområdet är att

öka kunskapen om djupförvaret, relevanta omvärldsfaktorer och omvärldsförändringar. Denna kunskap kan vara mycket värdefull som tillskott till planering, utredningar, samrådsförfarande och beslutsfattande inför tillståndsansökan. Kunskapen kan också vara viktig för den framtida driften av djupförvaret.

Den enskilda ortens ekonomiska situation och utveckling beror av en mängd olika omständigheter i dess omvärld. Hur ser den framtida svenska stat ut, som ska ta ansvaret för djupförvaret? Statlig lagstiftning, reglering och finansiering liksom landets ekonomiska situation påverkar. En annan viktig och faktisk omvärldsförändring är Sveriges deltagande i 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 just kärnavfallshanteringen och i vad mån kommer detta att kunna påverka den specifikt svenska kärnavfallshanteringen?

Program

Huvudinriktningen för de forskningsområden som SKB nu identifierat och avser att stödja ska vara mot tillämpad forskning. Resultaten ska helst kunna användas praktiskt, men det får även finnas ett gränssnitt mot grundforskningen. Vidare ska SKB:s forskningsområden, platsanpassade studier och utredningar ha tydliga kopplingar sinsemellan och förstärka varandra.

En särskild beredningsgrupp har utsetts. Den ska svara för att projekten har den vetenskapliga kvalitet och relevans som krävs, och att uppdragen riktas till forskare och forskargrupper som är lämpliga för uppgiften. Beredningsgruppen består av forskare inom samhälls- och beteendevetenskap.

De resultat som successivt kommer fram inom forskningsprogrammet ska i tillämpliga delar ingå i underlaget för tillståndsansökningar och MKB för inkapslingsanläggningen och djupförvaret. Programmet genomförs i första hand under en treårsperiod för att sedan utvärderas och beslut fattas om en eventuell förlängning.

Beslutsfattare och övriga intressenter kommer att ges möjlighet att ta del av resultat från pågående forskning. En del i forskningsuppgifterna är därför att kommunicera delresultat till olika målgrupper under tiden forskningen pågår. I uppgifterna ingår att aktivt delta i seminarier och möten samt att, förutom den vetenskapliga publiceringen, även publicera sina forskningsresultat i en lättillgänglig och populärvetenskaplig form. Målgrupperna för de populärvetenskapliga presentationerna är främst samrådsparterna.

En intresseförfrågan, baserad på den arbetsplan som togs fram under hösten 2003, skickades ut under våren 2004 till ett antal högskolor och universitet. Åtta forskningsprojekt som ska ingå i SKB:s samhällsvetenskapliga forskningsprogram valdes ut i en första ansökningsomgång och beviljades medel. De flesta är tvååriga för att ge utrymme för kompletteringar när forskningsresultaten successivt kommer fram. Nedan redovisas den huvudsakliga inriktningen av projekten under det forskningstema som i första hand berörs.

Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter

- Lokal utveckling och regional mobilisering kring tekniska och storskaliga projekt.

Projektet, som utförs av Institutionen för ekonomisk historia vid Umeå universitet, ska undersöka relationerna mellan storskaliga tekniska investeringar och lokalsamhällets långsiktiga socioekonomiska och politiska utveckling under olika perioder. Syftet är att bygga upp kunskap kring hur enskilda orters socioekonomiska struktur påverkas av att en ny, stor och tekniskt avancerad anläggning etableras. Kunskaperna kan bidra till SKB:s, kommunernas och andra intressenters bedömningar av hur djupförvarsetableringen kan komma att påverka en orts ekonomi på kort och lång sikt. Projektet kommer att pågå i två år och inleds hösten 2004.

I studien undersöks Oskarshamn och Forsmark vid tiden för beslut om kärnkraftsetablering (innovationsprojekt med ny teknik) samt tio år före och tio år efter. Jämförelser görs med referensorter där ingen etablering skett under den aktuella perioden. Jämförelser görs också med referensorter där projekt med en redan etablerad teknik har lokaliserats, exempelvis järnväg, vattenkraft (implementeringsprojekt med mogen teknik). Befolkning, pendling, inkomst, fastighetsvärden och näringsstruktur är exempel på viktiga indikatorer i projektet.

- Långsiktiga socioekonomiska effekter av stora investeringar på små och medelstora orter.

I detta projekt, som utförs av Kulturgeografiska institutionen vid Umeå universitet, ska investeringars långsiktiga lokala effekter på befolkning och sysselsättning analyseras. Det görs genom att avbilda det socioekonomiska systemet i en dynamisk simuleringsmodell där den långsiktiga effekten av investeringen avtecknar sig i jämförelsen mellan scenarier med och utan genomförd investering. Modellen blir ett instrument för konsekvensanalys som kan besvara viktiga frågor om investeringars betydelse för exempelvis befolkningsutveckling och arbetsdynamik på orten där investeringen äger rum. Projektet kommer att pågå i två år och inleds hösten 2004.

I projektet anpassas och används en mikrosimuleringsmodell där man följer och studerar individer i stället för grupper av individer (aggregat). Att ha information om den enskilde individens unika förutsättningar och omgivning är avgörande för att med precision avbilda dynamiken i det socioekonomiska systemet. Några exempel på frågeställningar som kommer att beröras i studien är hur pendlingsströmmar förändras, hur befolkningens storlek samt den demografiska och socioekonomiska sammansättningen kan påverkas, hur antalet sysselsatta inom olika delarbetsmarknader påverkas och så vidare.

Beslutsprocesser

- Allmänhet, expertis och deliberation.

Forskningsprojektet ska utföras på Forskningscentrum Människa-Teknik-Miljö vid Örebro universitet. Studien påbörjas i januari 2005 och pågår i ett och ett halvt år.

En etablering av ett djupförvar inbegriper en mängd avvägningar eftersom olika aspekter kan komma i konflikt med varandra. Samtidigt som långtgående krav ställs på säkerhet och hälsa finns krav på ett breddat deltagande i beslutsprocessen. Skälet för detta är dels att bedömningarna anses bli bättre genom att fler perspektiv än rent vetenskapliga tillförs processen och dels att trovärdigheten hos riskbedömningarna och legitimiteten i fattade beslut ökar.

Syftet med projektet är att bidra med kunskap om hur allmänhetens och experters olika förståelse och bedömningar kombineras i samråds- och beslutsprocesser knutna till etableringen av ett djupförvar. Studien utgår från frågan på vilket sätt man i en planeringsprocess kan ta hänsyn till både allmänhetens respektive experters förståelse av de risker som är förknippade med ett djupförvar.

I projektet analyseras de samråds- och beslutsprocesser som skapades under förstudieperioden. Huvudfokus ligger emellertid på de pågående platsundersökningarna i Oskarshamn och Östhammar, där intervjuer och deltagandeobservationer genomförs och analyseras tillsammans med skriftligt material.

- Resurs eller avfall? Internationella beslutsprocesser kring använt kärnbränsle.

Projektet, som genomförs av Avdelningen för teknik- och vetenskapshistoria vid KTH, syftar till att klarlägga och analysera beslutsprocesser kring kärnavfallet i ett internationellt och historiskt perspektiv. Hur har beslut förhandlats fram och vilka grupper har varit delaktiga? På vilket sätt skiljer sig den svenska beslutsprocessen jämfört med till exempel beslutsprocesserna i Finland, Frankrike och Tyskland? Genom att studera flera länder ur dessa båda perspektiv kan studien bidra till insikter om vilka faktorer som påverkar besluten, hur den politiska strukturen och allmänna synen på kärnavfall spelat in och hur synen på det använda bränslet har förändrats över tiden. Projektet kommer att pågå under två år och inleds hösten 2005.

Genomförandet sker bland annat genom intervjuer med nyckelpersoner i de utvalda länderna. KTH:s nätverk och kontakter med teknikhistoriker i andra länder kommer att användas på olika sätt. Artiklar och andra offentliga tryck kommer också att studeras.

Opinion och attityder – psykosociala aspekter

- Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner.

Forskningsprojektet ska utföras av Humanekologiska avdelningen vid Lunds universitet. Det startar hösten 2004 och ska pågå i ett år.

Tid och rum är objektivt mätbara dimensioner men upplevs samtidigt på högst varierade och subjektiva sätt av olika aktörer i olika sammanhang. Kärnavfallsfrågan aktualiserar tidsdjup och rumsliga avstånd som ligger utanför enskilda människors erfarenhetsmässiga referensramar. Detta är ett av skälen till att diskussionen om slutförvar av använt kärnbränsle är svår att föra enbart i rent tekniska termer. Den vidrör obönhörligen existentiella frågor om världens beständighet och mänsklighetens fortlevnad.

I detta projekt ska outtalade symboliska och upplevelserelaterade aspekter av debatten kring anläggningar för hantering och förvaring av kärnavfall studeras i tid och rum. Projektet ska bidra till en förbättrad samhällelig kunskap om villkoren för lokalisering av komplexa infrastrukturprojekt. Avsikten är att underlätta kommunikation mellan experter, intressenter och berörd lokalbefolkning genom en fördjupad kunskap om de kulturella dimensionerna bakom de olika parternas perspektiv och ställningstaganden. Projektet förväntas kunna identifiera specifika kommunikativa problemområden som förtjänar särskild uppmärksamhet i framtida överläggningar. Djupintervjuer och uppföljande intervjuer med olika aktörer ingår bland annat i genomförandet.

- Kärnavfallet – från energireserv till kvittblivningsproblem.

Syftet med projektet, som genomförs av Tema Teknik och social förändring vid Linköpings universitet, är att studera hur den mediala opinionsbildningen kring kärnavfallsfrågan har förändrats på det nationella planet från 1950-talet fram till idag. Iden är att med avfallsfrågan i centrum granska hur avfallsproblemet tolkats och förstås vid olika tidpunkter av de olika aktörer som engagerat sig i frågan. De långsiktiga historiska förskjutningarna i värderingsmönster på den nationella nivån kring lösningsförslag på ett gemensamt hanteringsproblem har inte undersökts tidigare. Kärnavfallsfrågans lösning är ett projekt som pågår under flera generationer och det är därför viktigt att få kunskap om värderingsfluktuationer på längre sikt.

I studien används ett redan insamlat material bestående av cirka 9 000 artiklar, debattböcker, broschyrer, utredningar och forskningsrapporter. Projektet ska pågå i två år med start hösten 2004.

- Attityder till djupförvar av använt kärnbränsle.

Projektet utförs av Centrum för riskforskning vid Handelshögskolan i Stockholm. Projektet kommer att pågå under två år med inledning hösten 2004.

Den internationella forskningen om riskattityder domineras helt av pessimistiska resultat angående möjligheterna att i samförstånd mellan industri, beslutsfattare och lokalbefolkning lokalisera förvar av använt kärnbränsle. Den amerikanska forskningen har ofta accepterats utan närmare kritisk granskning och det behövs forskning som utgår från speciella svenska förhållanden. De faktorer som i Sverige och Finland bidragit till en konstruktiv utveckling under lokaliseringsprocessen är därför av stort intresse att undersöka. Bland dessa faktorer finns tillit och moral som ofta försumrats i tidigare forskning.

I projektet ska de faktorer som påverkar riskuppfattningen och riskattityden avseende slutförvaring av använt kärnbränsle studeras. Syftet är att bidra till en bättre förståelse av risk och policyattityder som i sin tur är en förutsättning för en bättre och mer effektiv riskkommunikation. Studien är en fortsättning på den internationellt uppmärksammade undersökning som genomfördes under 2001 och som för första gången observerade en positiv eller accepterande inställning till en lokalisering av ett djupförvar. En del av det underlag som ska användas i projektet tas fram genom enkätundersökningar vid två tillfällen (september 2004 och mars 2006) i Östhammar och Oskarshamn samt en lämplig referenskommun.

Omvärldsförändringar

- Nationell kärnbränslepolitik i en europeisk union.

Syftet med denna studie, som ska utföras av Juridiska institutionen vid Handelshögskolan vid Göteborgs universitet, är att klarlägga och analysera det rättsliga läget på både svensk nationell och europeisk gemenskapsrättslig nivå när det gäller ansvaret för och befogenheterna över kärnavfallens omhändertagande. Projektet kommer att pågå i två år med början våren 2005.

Med utgångspunkt i Sveriges, och vissa medlemsstaters, intresse av att upprätthålla en nationell kärnbränslepolitik är det av stor vikt att ingående analysera relevanta delar av gemenskapsrätten. Syftet med en sådan analys är att söka fastställa en prognos för reglernas tolkning och att närmare definiera det rättsliga utrymmet för en nationell kärnbränslepolitik. En sådan kunskap är nödvändig för att rationella politiska beslut ska fattas på nationell nivå. Forskningsuppgiften innefattar även ett framåtblickande, resonerande perspektiv: Vilka framtida trender i den europeiska rättsutvecklingen kan vi bedöma som sannolika och hur kan de komma att påverka utformningen av en nationell kärnbränslepolitik?

23 Alternativa metoder

I praktiken har vi i Sverige redan prioriterat geologisk deponering för att ta hand om använt kärnbränsle. Vi följer en huvudlinje med ett system som baserar sig på djupförvaring enligt KBS-3-metoden. Olika alternativ till detta har utförligt redovisats och analyserats /23-1/. Resultatet av analysen ger ett starkt stöd för valet av huvudlinje (djupförvar enligt KBS-3-metoden). Samtidigt kommer emellertid SKB att fortsätta följa och stödja utvecklingen av alternativa metoder till huvudlinjen. De två alternativ som för närvarande tilldrar sig mest intresse är separation och transmutation samt deponering i djupa hål.

23.1 Separation och transmutation

Syftet med transmutation är att avsevärt minska den mängd av långlivade radionuklider som måste slutförvaras. Ett tekniskt mål som ibland uttalas för transmutation är att minska mängden långlivade radionuklider med en faktor 100. Om detta lyckas skulle radiotoxiciteten hos det kvarvarande högaktiva avfallet efter cirka 500 år ligga på en nivå jämförbar med den som använt kärnbränsle har efter cirka 100 000 år. De kvarvarande långlivade ämnena skulle dock fortfarande kräva ett djupförvar.

Transmutation eller omvandling av långlivade ämnen till stabila eller kortlivade ämnen sker i första hand med neutroner i en kärnreaktor, det vill säga samma kärnreaktioner som förekommer i en vanlig kärnreaktor. För transuraner är det i första hand kärnklyvning (fission) som ger en effektiv omvandling. För andra långlivade nuklider är det neutroninfångning. Vid kärnklyvning utvecklas stora mängder energi, som kan utnyttjas till exempel för elproduktion.

För att processen ska nå sitt syfte fordras att de långlivade ämnen som ska transmutteras skiljs från kvarvarande uran. I annat fall kommer det att bildas nya långlivade ämnen genom kärnreaktioner mellan uran och neutroner, det vill säga på samma sätt som transuranerna förut bildats (neutroninfångning) i de vanliga reaktorerna. För en lättvattenreaktor utgör uran cirka 95 procent av det kvarvarande bränslet. Upparbetning (och separation av olika ämnen) är således en förutsättning för transmutation. Man talar därför ofta om separation och transmutation som ett begrepp eller vanligare på engelska – partitioning and transmutation.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

I Fud 2001 konstaterade SKB att acceleratordrivna system är den alternativa utvecklingslinje för separation och transmutation som tilldrar sig störst intresse, såväl i Sverige som i flera andra länder. Utvecklingen av sådana system är mycket kostsam och starkt beroende av internationell samverkan. SKB konstaterade vidare att flera grundläggande tekniska frågor måste klargöras ytterligare genom forskning innan större projekt avseende acceleratordrivna system kan definieras. Med hänsyn till utvecklingsläget, erforderliga resurser samt gällande energipolitiska beslut i Sverige bedömer SKB det inte rimligt att ta egna initiativ till större utvecklingsprojekt.

Remissinstanserna hade inga specifika kommentarer till denna inriktning. Däremot hade några instanser (bland annat KTH och Uppsala universitet) uppfattningen att storleken på de svenska insatserna är för liten. Detta kommenterades av SKI /23-2/ som menade att bedömningen av SKB:s forskning inom separation och transmutation kompliceras av flera faktorer, och man framhöll följande punkter:

- Det rör sig om ett synnerligen kostnadskrävande forsknings- och utvecklingsarbete där de svenska finansiella insatserna alltid kommer att vara marginella.
- Drivkrafterna bakom tillkomsten av ett system för separation och transmutation kommer att under överskådlig tid ligga utom SKB:s och Sveriges kontroll.

- De politiska förutsättningarna för tillämpning av separation och transmutation i Sverige saknas.
- Det råder fortfarande stora osäkerheter både om, och i så fall när fungerande system kan finnas tillgängliga som fyller rimliga krav på effektivitet.

SKI:s bedömning är att den satsning som görs för närvarande är tillräcklig för att på ett meningsfullt sätt aktivt följa och bidra till den internationella utvecklingen, men att det samtidigt är en miniminivå som inte bör underskridas. Om svensk kärnkraft hade befunnit sig i en utbyggnadsfas, menade man, skulle en större satsning kunnat vara motiverad.

Enligt SKI har SKB:s program för separation och transmutation en lämplig inriktning som täcker allt från grundläggande forskning till teknisk utveckling. System- och säkerhetsanknuten forskning samt arbetet med koordination av projekt anser SKI är särskilt värdefulla, då de för rimliga kostnader ger förutsättningar för en god inblick i större internationella program.

SKI framhåller även att forskningen inom separation och transmutation är ett av de få områden inom kärntekniken som fortfarande kan dra till sig unga engagerade forskare. De satsningar som görs på separation och transmutation inom landet ska därför också ses som ett led i bevarandet av kompetensen inom de kärntekniska ämnena, främst reaktorfysik och kärnkemi. Av den anledningen finansierar även SKI verksamhet inom separation och transmutation, med ett belopp på cirka en halv miljon kronor per år.

Kasam har ingen invändning mot SKB:s framställning av nyvunnen kunskap på transmutationsområdet /23-3/. Det finns enligt Kasams uppfattning starka skäl för den nuvarande inriktningen av det svenska kärnavfallsprogrammet, det vill säga fortsatt utvecklingsarbete med inriktning mot direktdeponering enligt KBS-3-metoden.

Men man understryker samtidigt betydelsen av att SKB aktivt bevakar utvecklingen inom området separation och transmutation, och Kasam föreslår att regeringen begär att SKB i Fud-program 2004 presenterar ett mer utförligt underlag för bedömningar om lämplig ekonomisk nivå för denna bevakning.

Kasam delar SKB:s uppfattning att det inte är rimligt att bolaget för närvarande tar initiativ till större utvecklingsprojekt inom området separation och transmutation, men enligt Kasams uppfattning bör SKB hålla öppet för ökade insatser inom ramen för EU-finansierad forskning på transmutationsområdet som diskuteras för närvarande och kan leda till behov av ökade svenska insatser.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2001

En referensgrupp av svenska forskare har, på uppdrag av SKB, utarbetat en rapport om läget för forskningen om separation och transmutation i början av 2004 /23-4/. Underlaget för den följande redovisningen av kunskapsläget är hämtad från denna rapport. Rapporten sammanfattar utvecklingen sedan 1998 då en liknande rapport utarbetades för SKB:s räkning /23-5/.

Under de senaste åren har ett antal systemstudier kring separation och transmutation publicerats. Dessa studier ger en god överblick över det omfattande arbete som krävs för att realisera separation och transmutation, över det relativt stora och komplexa system av anläggningar som behövs, och över de problem som måste lösas innan ett system kan realiseras.

Den första av dessa systemstudier genomfördes av en expertgrupp inom OECD/NEA och publicerades 1999 /23-6/. Viktiga slutsatser från denna studie var bland annat:

- Grundläggande forskning och utveckling för separation och transmutation kräver långa ledtider och stora investeringar i anläggningar med snabba neutroner, kompletteringar av utrustningsanläggningar och byggande av fjärrstyrda anläggningar för bränsletillverkning.

- Separation av långlivade radiotoxiska ämnen från använt bränsle kan göras i tillbyggnader till existerande uppberetningsanläggningar. Det krävs dock ett stort arbete för att utveckla de nya processerna från laboratorieskala till industriell skala.
- Transmutation med snabba neutroner är effektivare än i existerande lättvattenreaktorer. Transmutation av transuraner kan bäst genomföras i snabba reaktorer eller i acceleratordrivna system med snabbt neutronspektrum.
- Separation och transmutation kommer inte att eliminera behovet av djupförvar för visst långlivat radioaktivt avfall från kärnbränsle.

I USA väcktes i början av 1990-talet ett visst intresse för transmutation med acceleratordrivna system. Centrum för detta intresse var Los Alamos National Laboratory, som lanserade konceptet ATW (Accelerator driven Transmutation of nuclear Waste). Detta ledde så småningom till en studie av ATW på begäran av kongressen och under ledning av USDOE. Studien, som publicerades hösten 1999 /23-7/, utmynnade i ett förslag till forskningsprogram för ATW som kunde utgöra inledningen till en storskalig satsning på ett sådant system. Vissa delar av detta arbete har sedan påbörjats, särskilt de delar som rör internationellt samarbete. Programmet i stort har dock inte accepterats som bas för USA:s forskning om avancerade kärnbränslecykler eller framtida kärnavfallsstrategi. Det var säkert inte heller avsett som ett komplett program utan mer som en djupdykning i ett av en mängd möjliga scenarier för utveckling av separation och transmutation.

Under 2003 aviserades i USA det så kallade Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI), som syftade till ett brett studium av bränslecykeln för framtida kärnkraftreaktorer – även kallade Generation IV reactors /23-8/. Detta planeras bestå av tre faser: fas ett grundläggande utvärdering; fas två visar på principerna (proof of principle) under 5–6 år; fas tre visar på funktion (proof of performance) under 15–20 år. Programmet är brett upplagt och omfattar en genomgång av alla aktuella system, reaktortyper och metoder för separation.

Efter initiativ från forskningsministrarna i Frankrike, Italien och Spanien bildades under 1999 en europeisk arbetsgrupp TWG. Denna arbetsgrupp föreslog en plan för utveckling av ett acceleratordrivet system (ADS) i Europa. Rapporten från TWG publicerades våren 2001 /23-9/. Ambitionen från gruppen var att planen skulle utgöra grund för det fortsatta EU-finansierade forskningsarbetet om ADS. I planen föreslås byggandet av en mindre experimentanläggning med ett ADS på cirka 100 megawatt termisk effekt. Anläggningen avses bli driftklar till 2015. Kostnaden för de första tolv årens program för forskning och utveckling samt konstruktion och byggande bedöms till 980 miljoner euro. Därtill föreslås ytterligare 180 miljoner euro för forskning och utveckling av bränsle som är lämpat för ADS. Denna första fas skulle sedan följas av en andra där man utvecklar och bygger en prototyp till en ADS i full skala. Efter framgångsrik drift av denna under några år skulle man slutligen kunna börja uppföra industriella anläggningar cirka år 2040. Denna studie stämmer tidsmässigt ganska väl med den av USDOE gjorda studien. I sina detaljer innehåller den dock avsevärda olikheter. Den amerikanska studien har betydligt mer specificerade val av system för såväl separation (pyrokemisk process) som transmutation (ATW kyld med flytande blandning av bly och vismut) än den europeiska. Den senare är avgränsad till transmutation med ADS, men håller flera delar av detta system öppet för senare val av utförande – accelerator, kylmedel med mera.

Arbetet inom OECD/NEA fortsattes inom ytterligare en expertgrupp som våren 2002 kom ut med en jämförande studie av snabba reaktorer och ADS för transmutation /23-10/. Gruppen gick igenom ett antal olika strategier för separation och transmutation av transuraner baserade på lättvattenreaktorer, snabba reaktorer och acceleratordrivna system. Bland de allmänna slutsatser som dras är bland andra följande:

- Även om separation och transmutation inte kan ersätta behovet av ett geologiskt djupförvar för högaktivt avfall kan olika transmutationsstrategier signifikant (hundrafalt eller mer) reducera innehållet av långlivade radioaktiva ämnen som måste placeras i ett sådant förvar. Detta förbättrar miljöegenskaperna för kärnenergin och kan bidra till ett uthålligt kärnenergisystem.

- Mycket effektiva metoder för transmutation i snabba neutronspektra och för multipel återcykling av kärnbränslet med mycket små förluster krävs för att uppnå dessa mål.
- Multipel återföring, som hanterar plutonium och andra transuraner antingen separat eller tillsammans, kan uppnå jämförbara reduktionsfaktorer för radiotoxicitet hos det avfall som måste slutförvaras.
- Pyrokemisk upparbetning (separation) är viktig för bränslecykler som innefattar bränslen med mycket högt innehåll av americium och/eller curium för förbränning i ADS eller snabba reaktorer.
- Om plutonium och andra transuraner ska hållas tillsammans vid hanteringen får valet mellan ADS och snabba reaktorer baseras på ekonomiska, säkerhetsmässiga och andra faktorer.
- Separat hantering av plutonium och andra transuraner medger att plutonium till stor del kan förbrännas i vanliga reaktorer (lättvattenreaktorer) varigenom behovet av ADS och/eller snabba reaktorer minskar.
- Vill man genomföra separation och transmutation krävs mer forskning och utveckling framför allt om bränsle-, återförings-, accelerator- och reaktorteknik. Införandet av separation och transmutation bör troligen ske stegvis och i en takt avpassad till de nationella systemens förutsättningar.
- Man kan åstadkomma en helt sluten bränslecykel inom en begränsad kostnadsökning på tio till 20 procent av elproduktionskostnaden jämfört med den för lättvattenreaktorer med direktdeponering.
- Införandet av system för separation och transmutation kräver lång förberedelsestid för att utveckla tekniken och göra den kostnadseffektiv.

Några av de viktigare tekniska slutsatserna från denna studie är följande:

- För att uppnå målet att reducera mängden långlivade nuklider i avfallet med en faktor 100 eller mer måste förlusterna i varje separationscykel vara mindre än 0,1 procent.
- Transmutation av endast plutonium minskar den långsiktiga radiotoxiciteten med endast en faktor fem i jämförelse med använt bränsle.
- Transmutation kan åstadkommas antingen med snabba reaktorer eller med olika kombinationer av lättvattenreaktorer, snabba reaktorer och acceleratordrivna system.
- Fysikaliska begränsningar gör att det krävs lång tid att genomföra en fullständig transmutation. Detta innebär att man kan uppnå de beskrivna målen endast om man avser att använda tekniken i minst 100 år.
- Användningen av pyrokemiska metoder för separation innebär nya potentiella kemiska och radiologiska risker som måste behärskas.
- Alla transmutationsstrategier för lättvattenreaktorer ger avsevärda kvantiteter utarmat och bestrålat uran som måste tas om hand.
- Transmutation av långlivade klyvningsprodukter innebär flera tekniska och praktiska svårigheter. För närvarande verkar teknetium-99 och möjligen jod-129 vara de främsta eller kanske enda kandidaterna.
- Experimentell forskning om transuranbränsle är ett högt prioriterat område. En flaskhals för sådan forskning är tillgången på anläggningar med högt flöde av snabba neutroner.
- Den grundläggande forskningen och utvecklingen av såväl snabba reaktorer som acceleratordrivna system skulle förenklas om man fick en bättre samstämmighet om för- respektive nackdelar för olika slags kylmedel för dessa system.

Pågående forskning om separation

Den så kallade Purex-processen, som används i existerande industriell upparbetning, använder fosforbaserade organiska ämnen som extraktionsreagens. En nackdel med dessa är att de ger avsevärda mängder medelaktivt avfall, som är förorenat med långlivade radionuklider. Man söker därför efter extraktionsreagens som enbart består av kol, väte, syre och kväve. Dessa kan förbrännas fullständigt, varvid de radioaktiva ämnena upptas på filter. Volymen radioaktivt avfall kan på detta sätt minskas väsentligt jämfört med nu använd teknik. Den pågående forskningen är till stor del inriktad på denna typ av reagens.

Forskningen på vattenbaserade separationsprocesser har haft vissa framgångar under de senaste åren och man hyser gott hopp att kunna utveckla en process som återvinner över 99,9 procent av såväl uran som alla transuraner från använt bränsle. Problemen är framför allt kostnaden och strålningsbeständigheten hos de organiska molekylerna.

Har man en gång definierat en process som fungerar väl i liten skala är dock extrapolationen till industriell skala inte något stort problem. De tekniska komponenter som behövs i en sådan process är väl beprövade i andra tillämpningar.

De organiska molekylernas begränsade beständighet mot den starka joniserande strålningen från det högaktiva avfallet bidrog tidigt till att man försökte utveckla icke-vattenbaserade separationsmetoder. Forskningen inriktades tidigt på pyrokemiska processer. På 1950-talet byggdes en sådan process vid brytareaktorn EBR-II i USA. Denna hade metalliskt bränsle och kylades med flytande natrium. Upparbetningen av bränslet gjordes med en kontrollerad oxidativ slaggning efter det att bränslet smälts. Det reade smälta bränslet göts sedan direkt om till nytt bränsle som återfördes till reaktorn. En annan mer lovande pyrokemisk metod var fluoridförångning som prövades vid MSRE-projektet med bränsle i form av smälta salter. Denna metod vidareutvecklades även för lättvattenbränsle, men stötte på stora svårigheter i början på 1970-talet. Svårigheterna var bland annat att hålla nere processförlusterna, kontrollen av kriticitet, hanteringen av små mängder vattenånga och syre samt korrosion.

De tekniska problemen gjorde att utvecklingen av pyrokemiska metoder minskade starkt under 1970- och 1980-talen. Intresset återupplivades emellertid parallellt med att intresset för separation och transmutation ökade i början av 1990-talet. Forskningen ökade framför allt i Japan men senare även i USA, Ryssland och Europa. De pyrokemiska metoderna bedöms framför allt vara av intresse för upparbetning eller separation av bränsle med mycket hög strålning till exempel bränsle med i huvudsak americium, curium och plutonium med stor andel tunga isotoper.

Utveckling av pyrokemiska separationsprocesser kräver även en teknisk utveckling av utrustning som lämpar sig för industriell tillämpning. Material- och korrosionsfrågor måste lösas, liksom olika tekniska och radiologiska säkerhetsfrågor. Vägen till industriell tillämpning är troligen längre för pyrokemiska processer än för de vattenbaserade.

Pågående forskning om transmutation

De radionuklider som i första hand är av intresse för transmutation är transuranerna. Dessa transmutteras lämpligast med kärnklyvning med hjälp av neutroner. Flera av dessa nuklider är emellertid endast klyvbara med snabba neutroner. Två typer av anläggningar övervägs för att åstadkomma en stark flux av snabba neutroner – en snabbreaktor med självunderhållande kärnreaktioner och ett accelerator drivet underkritiskt system (ADS). Under perioden 1950–1985 byggdes ett flertal snabba reaktorer i flera länder. De flesta hade flytande natrium som kylmedel. Den största var Superphénix i Frankrike en elproducerande anläggning med en effekt på 1 200 megawatt el. Endast ett fåtal av dessa brytareaktorer är dock fortfarande i drift.

Under 1990-talet ökade intresset för acceleratordrivna system och för närvarande finns ett betydande intresse för utforskningen av sådana system. I Sverige är nästan all transmutationsforskning fokuserad mot ADS. Ett ADS består av följande huvudkomponenter:

- En protonaccelerator som kan ge en stark ström (några få upp till tiotals milliampere) av protoner med upp till cirka 1 GeV energi per proton.
- En spallationskälla där protonströmmen träffar tunga atomkärnor (bly, vismut, wolfram, tantal eller liknande) och via spallation frigör tiotals neutroner per infallande proton.
- En underkritisk kärnreaktor med bränsle som innehåller de långlivade radionuklider som ska transmutteras. Eftersom transmutationen sker genom kärnklyvning frigörs ytterligare neutroner. För varje neutron från spallationskällan bildas på så sätt cirka 20 neutroner, som ger kärnklyvningar. Reaktorn utformas så att en självunderhållande kedjereaktion inte kan uppkomma.
- Utrustning för att kyla bort den värme som frigörs och ta hand om energin på lämpligt sätt (till exempel för elproduktion).
- Utrustning för att styra, övervaka och kontrollera hela anläggningen.

Protonacceleratorer kan vara av två olika principutföranden – en linjeär accelerator eller en cyklotron (cirkulär partikelbana). Cyklotroner har vissa tekniska begränsningar i fråga om protonenergi, strömstyrka och flexibilitet. Detta gör att intresset alltmer fokuseras mot en linjär accelerator. En sådan maskin för den önskade protonenergin blir en mycket stor apparat – flera hundra meter lång – och ställer stora krav på all möjlig teknik och även på strålskyddet.

Acceleratorer har hittills huvudsakligen byggts för rena forskningsuppgifter där kraven på tillgänglighet varit måttliga. En anläggning för transmutation innehåller emellertid stora system med hög temperatur och inbyggd tröghet för förändringar i systemens tillstånd. Detta tillsammans med krav på effektivitet och rimlig ekonomi ställer starkt ökade krav på tillgängligheten hos acceleratorer till ADS.

Spallationskällan är en central komponent i ADS placerad mellan acceleratorn och den underkritiska reaktorn. Den är utsatt för en krävande miljö med hög strålning, hög temperatur, starkt varierande tryck och krav på mycket effektiv kylning. Olika tunga material kan i princip tänkas för källan (bly, vismut, wolfram, tantal etc) men med hänsyn till kylningen och andra krav är för närvarande en blandning av flytande bly och vismut den främsta kandidaten. En viktig fråga är utformningen av fönstret mellan källan och det vakuumrör som leder protonstrålen från acceleratorn till källan av bly och vismut. Alternativen är ett ”varmt” fönster bestående av en strålningsbeständig specialmetall eller ett ”kallt” fönster placerat en bit från spallationskällan. Det senare fallet ställer stora krav på upprätthållande av tillräckligt gott vakuum i ”tilloppskanalen” mellan fönstret och spallationsmaterialet så att protonerna inte förlorar energi på vägen. Ett ”varmt” fönster ställer å andra sidan utomordentliga krav på strålningsbeständighet och hållfasthet så att fönsterbyten kan begränsas till högst en gång om året. För närvarande byggs eller planeras två större spallationskällor i Europa med flytande bly-vismut dels Megapie vid PSI i Schweiz, där man valt en konstruktion med ”varmt” fönster, och dels Myrrha vid Mol i Belgien, där man ämnar prova ett utförande med ”kallt” fönster.

Olika typer av utförande diskuteras för den underkritiska reaktorn. Såväl bränsle som kylmedel är ännu öppna för val. Vatten är otänkbart för kylning om man vill ha ett snabbt neutronspektrum. Tankbara val är gas (särskilt helium) eller flytande metall. Gaskylning kräver högt tryck och förkastas därför av många med hänsyn till säkerheten vid bortfall av kylningen. Flytande natrium har man betydande erfarenheter av från tidigare program för snabba reaktorer. De problem som därvid framkommit avskräcker tydligen, åtminstone för närvarande, och intresset riktas alltmer mot flytande bly-vismut i eutektisk blandning. Detta har en relativt låg smältpunkt och en hög kokpunkt, och är dessutom första kandidat till material i spallationskällan. Det senare förenklar naturligtvis utformningen av systemen. Erfarenheter från reaktorer kylda med flytande bly-vismut finns endast i Ryssland, där man byggt och drivit reaktorer med detta kylmedel till sju stycken atomubåtar.

Forskningen om bränsle för ADS följer flera parallella linjer. Nitrider och legeringar med inerta metaller, till exempel zirkonium, tilldrar sig betydande intresse. Kraven på bränslet innebär bland annat god värmeledningsförmåga som medger hög effekttäthet, god bestrålningsbeständighet och möjlighet till mycket hög utbränning – tiotals procent jämfört med några få procent i dagens lättvattenreaktorbränsle. Inom ramen för ett EU-finansierat projekt kommer bränslestavar med plutoniumnitrid att bestrålas i R2-reaktorn i Studsvik under de närmaste åren.

Snabba reaktorer kan som redan nämnts användas för transmutation. Under 1990-talet var bränsleforskningen bland annat inriktad på förbränning av plutonium i natriumkylda snabbreaktorer. Speciella typer av bränsle studerades i Frankrike. Under senare år har intresset i bland annat Frankrike också riktats mot gaskylda snabbreaktorer. Snabbreaktorn kan också användas för transmutation av andra transuraner. Detta kräver dock speciell utformning, så att man inte allvarligt försämrar reaktorns dynamiska och säkerhetsmässiga egenskaper. Utformar man snabbreaktorn som en bridreaktor kan man dels uppnå en mycket hög energiutvinning från det uran som man tar upp ur jordskorpan och dels en effektiv transmutation av alla transuraner. Studier inom OECD/NEA anger att man med en bridreaktor kan ta ut upp till 100 gånger mer energi per ton natururan jämfört med en lättvattenreaktor med direktdeponering (engångscykel /23-10/.

I Ryssland intresserar man sig också för civila tillämpningar av snabba reaktorer kylda med flytande bly-vismut. Dessutom görs vissa insatser på ADS i huvudsak finansierat via det så kallade ISTC-programmet (ISTC, International Science and Technology Centre).

Som redan har nämnts är system med hög flux av snabba neutroner av störst intresse om man vill åstadkomma en nära nog fullständig förbränning av alla långlivade transuraner. Nöjer man sig med att transmuttera plutonium kan man emellertid också komma långt med andra system. Franska studier visar att man med speciell utformning av bränsleelementen kan begränsa och stabilisera mängden bildat plutonium enbart med lättvattenreaktorer. Studier av General Atomics i USA med flera har visat att man kan utveckla ett bränsle till gaskylda högtemperaturreaktorer som medger utbränning upp till 700 MWd per kilogram och förbränning av mer än 90 procent av aktinidinhållet, inklusive plutonium-239.

Forskning inom EU

Den pågående forskningen har delvis berörts i det föregående avsnittet. Relativt stora forskningsprogram pågår som redan framgått i flera länder. De mest omfattande nationella programmen är i Frankrike, Japan och USA. Inom EU sker dessutom en betydande samverkan mellan medlemsländerna inom projekt som delfinansieras av EC (European Commission). EU-programmet för forskning om separation och transmutation har växt i omfattning under det senaste decenniet, se tabell 23-1.

EU:s femte ramprogram samordnas i så kallade kluster knutna till EU:s Adopt-network som har uppgiften att utveckla samordning och samstämmighet mellan de olika EU-projekten och med de nationella programmen. Adopt försöker även identifiera luckor i programmen och ska ge underlag för nya forskningsprojekt. Projekten är beträffande transmutation starkt inriktade mot acceleratordrivna system. Det största projektet är en preliminär designstudie av ett acceleratordrivet system – PDS-XADS. Det leds av Framatome i Frankrike och har inte mindre än 25 deltagande partner. Bränslestudier avseende plutonium- och americiumnitrid (Confirm), -oxider

Tabell 23-1. Omfattningen av EU:s program för forskning om separation och transmutation.

| Program | Tidsperiod då projekt beslutas och startas | EU-anslag i miljoner euro till forskning och utveckling av separation och transmutation |
|-----------------|--|---|
| FWP 3 | 1991–1994 | 4,8 |
| FWP 4 | 1994–1998 | 5,8 |
| FWP 5 | 1999–2002 | 28,6 |
| FWP 6 tentative | 2003–2006 | 30–35 |

(Future) samt toriumbränslen ingår i klustret Fuetra. Ett antal tekniska specialstudier har samlats inom Testra. De avser strålningspåverkan på material, särskilt fönster, för spallationskällor (Spire), teknologi för system kyllda med bly-vismut (Tecla) och medverkan i Megapie-projektet vid PSI med provning av en spallationskälla med bly-vismut. Grundläggande data tas fram inom de projekt som ingår i Bastra. Projekt Muse omfattar reaktorfyikaliska mätningar på underkritiska system med snabbt neutronspektrum och genomförs i Cadarache i Frankrike. Hindas och N-TOF avser mätningar av reaktionstvårsnitt för neutroner med höga energier med mera. Pyrokemiska separationsprocesser studerades inom Pyrorep. Projektet Partnew undersökte olika organiska ämnen, som eventuellt skulle kunna användas för separation av tyngre transuraner. Calixpart studerade en annan typ av organiska ämnen för separation av bland annat aktinider, cesium och teknetium. Inom det sjätte ramprogrammet samordnas alla separationsstudier inom ett så kallat integrerat projekt Europart, som startade i början av 2004. På motsvarande sätt planeras en samordning av transmutationsprojekten inom Eurotrans. Detta väntas dock starta tidigast i början av 2005.

Forskning inom Sverige

Sedan 1991 driver institutionen för kärnkemi vid Chalmers tekniska högskola av SKB finansierad forskning inom separation. Forskning om transmutation vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm koncentreras i huvudsak till acceleratordrivna system (ADS). Forskningen vid institutionen för kärn- och reaktorfyisik stöds sedan 1993 av SKB. Vid The Svedberg-laboratoriet (TSL) och institutionen för neutronfyisik vid universitetet i Uppsala drivs projekt för att mäta tvårsnitt för neutroner i högenergiområdet 20 till 100 MeV. Projekten finansieras bland annat med bidrag från SKB, kärnkraftverken och SKI.

De svenska forskningsgrupperna medverkar i flera EU-projekt. För Confirm är KTH, Institutionen för kärn- och reaktorfyisik, koordinator och inom det projektet ska bestrålning av plutoniumnitridbränsle (PuN-bränsle) utföras vid R2-reaktorn i Studsvik. Ytterligare EU-projekt där svenska forskningsgrupper medverkar är PDS-XADS (KTH), Future (KTH), Spire (KTH), Tecla (KTH, Kärnsäkerhet är koordinator), Muse (KTH), Hindas (UU) samt Partnew och det nya Europart (CTH, Kärnkemi deltar i båda). Inom ramen för Tecla-projektet har man byggt en särskild krets i ett laboratorium vid KTH för att kunna studera termohydrauliska förhållanden vid bly-vismut-kylning. Detta projekt finansierades inom EU:s fjärde ramprogram. En fortsättning avses komma inom det sjätte ramprogrammet, som en del av Eurotrans, där för övrigt såväl KTH som Uppsala universitet planerar att medverka.

Det svenska forskningsprogrammet finansieras i huvudsak av SKB och är delvis samordnat med de projekt där de svenska grupperna deltar i EU-projekt. SKB har lämnat ett mindre stöd till alla dessa projekt utom Tecla. Resultaten från de svenska forskningsarbetena redovisas främst i olika vetenskapliga publikationer. Vidare sammanställs årsrapporter av de tre grupperna vid CTH, KTH och Uppsala universitet. De senaste tre årens rapporter /23-11 till 23-20/ innehåller sammanfattningar av de viktigaste resultaten samt abstract, särtryck av och/eller referenser till de vetenskapliga arbetena. Under åren 2001–2003 har två doktorsexamina, fem licentiatexamina och fem examensarbeten för grundexamen baserats på arbeten inom det svenska programmet för forskning om separation och transmutation.

Kärnkemigruppen vid CTH har under senare år alltmer knutit sin forskning inom separation till de delvis EU-finansierade projekt som kort redovisats i det föregående. Bland de viktigare arbetena under senare år kan nämnas följande. Man har undersökt bildningen av nitratkomplex med prometium, europium, americium och curium. Resultaten av dessa är snart klara för publicering. Även komplexbildning med nitrat för andra lantanider har undersökts experimentellt.

Man har bestämt grundläggande kemiska egenskaper för bromodekansyra. Det är viktigt att känna till hur detta extraktionsreagens fungerar när det används i kombination med olika kvävebaserade synergiagens. Resultaten kommer förhoppningsvis att ge information om extraktionsmekanismen.

Vidare har man studerat grundläggande kemiska egenskaper för flera kvävebaserade synergi-reagens. Resultat har publicerats för två av reagensen. Flera andra föreningar, syntetiserade av University of Reading, har också provats, men resultaten är ännu inte färdiga för publicering.

Ett mixer-settler batteri har tagits i drift och modifierats för processtudier av ligander utvecklade inom Partnew-projektet. Först bestämdes processparametrar för ett analogt system varefter resultaten från detta användes för att utforma en separationsprocess för de önskade ämnena. Med hänsyn till kostnaden för de specialkomponerade reagensen kunde denna process emellertid inte provköras. Förhoppningsvis kan den prövas inom projektet Europart genom användning av ny mikroseparationsteknik.

Prediktioner av fördelningen av metall mellan organisk fas och vattenfas kan göras med modeller som använder teori för löslighetsparametrar. Man har visat att fördelningskoefficienter för blandningar av lösningsmedel kan simuleras med god noggrannhet. Den förbättrade teorin har publicerats.

Tonvikten för forskning om transmutation vid institutionen för kärn- och reaktorfysik, KTH, ligger på säkerhetsaspekter hos acceleratordrivna system. Vid avdelningen har man utvecklat en datorkod baserad på Monte-Carlo-metoden för att simulera utbränning i en underkritisk reaktor kopplad till en acceleratordriven neutronkälla. Programmet använder omfattande databibliotek med kontinuerligt energiberöende reaktionstvåsnitt, sönderfallsscheman, isomera tillstånd, utbyten av klyvningsprodukter från olika nuklider etc. Programmet kan simulera neutrontransport, materialtäthet och utbränning i tre dimensioner.

Forskningen vid KTH har under senare år varit knuten till projekt inom EU:s ramprogram där avdelningen aktivt medverkar. Följande exempel kan nämnas:

- Studier av härdutformning i underkritiska reaktorer till ADS med sikte på höga transmutionsrater och goda säkerhetsegenskaper. Såväl bly-vismut-kylda som gaskylda system har analyserats som ett led i EU-projektet PDS-XADS.
- Analyser av ADS-dynamik och viktiga reaktivitetsåterkopplingar.
- Nödkylning av resteffekt från ADS.
- Medverkan i underkritiska experiment i Cadarache (EU-projektet Muse – snabba neutroner) och i Minsk (ISTC-projektet Yalina – termiska neutroner).
- Medverkan vid utformning av underkritiskt experiment i Dubna (ISTC-projektet SAD – snabba neutroner).
- Känslighetsanalyser för kärndata i anknytning till PDS-XADS,

Avdelningen medverkar också i studier av potentialen för transmutation i gaskylda reaktorer med hög temperatur (HTGR).

Inom EU:s sjätte ramprogram är KTH-gruppen koordinator för projekt RedImpact, som syftar till att kartlägga vilka avfallsströmmar som uppkommer i samband med separation och transmutation och hur dessa påverkar avfallshanteringen jämfört med nu tillämpade metoder för omhändertagande av använt kärnbränsle. Även SKB har en liten del av detta projekt.

Transmutation kräver avancerade bränsletyper. Inom EU-programmet studeras olika alternativa bränslematerial. KTH-gruppen är koordinator för projektet Confirm som undersöker nitridbränslen med plutonium och americium, bland annat genom bestrålning av PuN-stavar i R2-reaktorn i Studsvik.

Verksamhet inom kärnreaktionsgruppen vid institutionen för neutronforskning vid Uppsala universitet (INF) är inriktad mot experimentella studier av kärnfysikaliska reaktionssannolikheter för olika tillämpningsområden, som transmutation av kärnavfall, biomedicinska effekter och tillförlitlighet hos elektronik. Den experimentella verksamheten bedrivs huvudsakligen vid The Svedberglaboratoriet (TSL) i Uppsala, där gruppen tidigare utvecklat två världsunik

instrument, Medley och Scandal. SKB finansierar tillsammans med SKI och kraftföretagen projektet Natt, Neutrondata för Accelerator driven Transmutationsteknik.

Viktiga resultat under sedan 2001 är bland annat:

- Två världsunika experimentfaciliteter har färdigställts, och de första resultaten har publicerats.
- Analys och dokumentation har färdigställts av tidigare utförda mätningar av elastisk neutronspridning mot kol och bly vid 96 MeV. Precisionen i resultaten överträffar tidigare data med åtminstone en storleksordning. Dessa mätningar representerar den högsta energi i neutronspridning där grundtillståndet kan separeras från exciterade tillstånd. Resultaten visar att samtliga tidigare teorimodeller underskattat sannolikheten för elastisk neutronspridning vid denna energi med 0–30 procent.
- En ny metod för att mäta absoluta sannolikheter för neutroninducerade kärnreaktioner med enbart experimentella tekniker har utarbetats. Tidigare är endast två sådana metoder kända.
- Beslut har fattats vid TSL om att bygga en ny, radikalt förbättrad neutronfacilitet. Första experiment med denna anläggning utfördes i januari 2004.
- Ett nytt experimentinstrument för mätning av inelastisk neutronspridning har byggts, testats och befunnits uppfylla specifikationerna. Detta arbete gjordes i samarbete med två franska forskargrupper från Caen och Nantes. Instrumentet avser man att använda för en serie experiment under de kommande åren.
- Gruppens tidigare arbeten inom kärndata för bedömning av tillförlitlighet hos elektronik har lett till en ny industristandard i USA.
- Klara indikationer på trekropparkrafter har observerats i neutronspridning mot tungt väte. På sikt kan detta vara av mycket stor betydelse för utveckling av avancerade teorier för komplexa atomkärnor.
- Verksamheten har expanderat kraftigt i och med att INF sedan 2003 bedriver uppdragsutbildning för KSU:s räkning.

Framtida utveckling av separation och transmutation

Insatserna för forskning och utveckling av separation och transmutation har ökat något under perioden 1998–2003. Internationellt har forskning om separation och transmutation intagit en framträdande roll inom den forskning och utveckling som bedrivs om framtida kärnkraft- och kärnbränslecykelsystem.

Trots det faktum att separation och transmutation har stått på agendan under ganska många år finns det fortfarande ett antal frågor som måste klaras ut innan forskning och utveckling på området kan ges en klart fokuserad inriktning. Tidigare nämnda studier i USA och i Europa har delvis försökt att definiera det program som krävs för att komma i ett sådant läge. I studierna föreslogs forskningsprogram för cirka sex år till kostnader på ett par hundra miljoner euro.

Byggandet av en mindre experimentanläggning med ADS är ett nödvändigt steg för att utveckla och demonstrera konceptet. Denna experimentanläggning bör sedan följas av en demonstrationsanläggning i nära full skala. En sådan kan stå klar tidigast i mitten på 2030-talet.

Ett antal faktorer har emellertid bidragit till att farten, intensiteten och anslagen för insatserna är mycket mindre än vad som föreslogs.

Det finns ingen enhetlig syn på de strategiska målen för separation och transmutation. Många ser målet som ett sätt att nå en bred acceptans för kärnenergi i stort. Andra ser det som ett sätt att komma ur den blockering som drabbat djupförvarsfrågan i flera länder. Återigen andra fäster stor vikt vid spridningsriskerna som uppstår när lagren av plutonium från lättvattenreaktorbränsle, från andra reaktorer och från avveckling av kärnvapen växer.

Det finns ingen enhetlig syn på behovet av att utveckla acceleratordrivna system eller för dessa systems roll vid separation och transmutation. Några förordar att ADS ska användas för att transmuttera alla transuraner från uranbränsle i nuvarande lättvattenreaktorer. Andra ser ADS som ett komplement som är särskilt lämpat för att transmuttera neptunium, americium och curium medan merparten plutonium bör förbrännas i lättvattenreaktorer. På sikt kan dessa eventuellt ersättas av snabba reaktorer.

Det finns ingen samsyn mellan experter om vilken teknisk inriktning man bör följa för viktiga delar av ett system för separation och transmutation.

Intresset för separation och transmutation är huvudsakligen koncentrerat till forskningslaboratorier i USA, Europa, Japan och några andra länder. Universiteten i många länder, inklusive Sverige visar också stort intresse för separation och transmutation. Forskningen tilldrar sig betydande intresse bland studenter i kärntekniska vetenskaper. Flera viktiga program pågår vid universitet och forskningslaboratorier i många länder.

Kärnenergiindustrin har emellertid endast visat ett begränsat intresse för denna utveckling. Det är huvudsakligen märkbart i Frankrike och några få andra länder med stora kärnkraftprogram. Kärnenergiindustrins långsiktiga intresse är mer fokuserat på nya typer av reaktorer – ofta kallade Generation IV.

De nationella och industriella insatserna på använt kärnbränsle och högaktivt avfall i nästan alla länder är (och bör vara) fokuserade på att lösa frågor kring geologisk djupförvaring. Trots alla förseningar och bakslag i många länder är dock utsikterna att nå detta mål mycket bättre och ligger mycket närmare i tiden än det mycket långsiktiga och kostsamma målet att utveckla, "sjösätta" och driva ett effektivt system för separation och transmutation.

En sammanvägning av dessa olika omständigheter leder till slutsatsen att det är osannolikt att ADS-anläggningar i industriell skala kan tas i bruk före 2050.

En framgångsrik utveckling av separation och transmutation kommer inte att göra djup geologisk förvaring föråldrad. De komplexa processerna kommer oundvikligen att ge visst avfall med små mängder långlivade radionuklider. För detta avfall behövs djupförvar. En framgångsrik utveckling kan emellertid dels minska kraven på de tekniska barriärerna i djupförvaret och dels minska de volymer berg som behövs för deponering av avfall.

För svensk del är det viktigt att följa den internationella utvecklingen och att upprätthålla en rimlig kompetens inom landet så länge som vi har en betydande andel av kärnkraft i elproduktionssystemet. Kompetens utvecklad genom forskning och utveckling inom området separation och transmutation är värdefull och användbar även i arbetet att underhålla och utveckla säkerhet och bränsleförsörjning för de existerande lättvattenreaktorerna. Den är också viktig för att bedöma den fortsatta utvecklingen för kärnavfallshanteringen

Såsom redan nämnts kan utvecklingen av separation och transmutation för tillämpning i stor skala förväntas ta flera decennier. För att sedan transmuttera allt kärnbränsle bara från de nu existerande kärnreaktorerna kommer det att krävas ytterligare åtminstone 100 år. Separation och transmutation i industriell skala kräver stora kärntekniska anläggningar, som måste accepteras av samhället.

Införande av ett system för separation och transmutation, för att effektivt reducera den mängd långlivade radionuklider som måste slutförvaras i ett geologiskt djupförvar, kräver således en bindning till kärnenergi för mycket lång tid.

Kostnaderna för separation och transmutation är inte möjliga att förutse med någon god säkerhet innan systemen definierats och provats bättre. De uppskattningar som gjorts pekar på elproduktionskostnader som ligger mellan 10 och 50 procent över dem från dagens lättvattenreaktorer. De investeringar som krävs i forskning och utveckling och i nya anläggningar är utomordentligt omfattande. De är dock utspridda över lång tid och större delen får ses som investeringar i energiproduktion. Det är inte ekonomiskt rimligt att genomföra separation och transmutation

utan att nyttiggöra energin. Detta gäller framför allt transmutation av plutonium. Vissa experter anser att man kan bygga mindre ADS-anläggningar för transmutation av americium, curium och neptunium.

Program

Målet för SKB:s forskning rörande separation och transmutation av långlivade radioaktiva ämnen är 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 sluthantering av kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken.

Underlag tas fram fortlöpande enligt årliga verksamhetsplaner. Samlade bedömningar sker inför viktiga beslut i kärnavfallsprogrammet. En samlad bedömning ska också ske vid utvärderingen efter det första steget med deponering av inkapslat kärnbränsle i djupförvar.

SKB konstaterar att acceleratordrivna system fortfarande är den alternativa utvecklingslinje för transmutation som tilldrar sig störst intresse, såväl i Sverige som i flera andra länder. Med hänsyn till utvecklingsläget, erforderliga resurser samt gällande energipolitiska beslut i Sverige bedömer SKB det inte rimligt att ta egna initiativ till större utvecklingsprojekt.

En fråga som berördes i granskningen av Fud-program 2001 är vad som är en rimlig omfattning på de svenska forskningsinsatserna för separation och transmutation. Några universitet och högskolor menade att SKB:s insatser är för små, SKI ansåg att i det givna läget är de av rimlig omfattning och Kasam efterlyste en utredning om lämplig storlek. Den nödvändiga insatsens storlek är naturligtvis beroende på mål och ambitionsnivå men också på tidsperspektivet. Som framgår av de studier som kort redovisats i det föregående är tidsperspektivet mycket långt. Man får räkna med flera decennier innan tekniken kan tänkas nå mognad för industriell tillämpning. Vidare är det program för forskning och utveckling, som fordras för framgång, synnerligen omfattande och krävande, och kan endast genomföras i en bred internationell samverkan. Det specifikt svenska bidraget kommer endast att kunna vara marginellt. Det är emellertid viktigt att utveckla och vidmakthålla kompetens för att kunna följa och bedöma den internationella utvecklingen. När SKB engagerade sig i forskningen om separation och transmutation gjordes bedömningen att det är viktigt att utveckla kompetens både på området separation och på området transmutation. Med hänsyn till kravet att inte dra alltför stora resurser från det prioriterade området för forskning och utveckling – geologisk djupförvaring – bedömdes det dels lämpligt att stödja forskning vid universitet och högskolor i första hand som doktorsarbeten och dels att koncentrera stödet till ett par institutioner. Ett stöd till forskning om separation och transmutation bidrar även till utveckling av kompetens som i ett vidare perspektiv är av intresse och nytta för hela kärnavfallsområdet och för kärnenergiområdet i stort. Detta påpekade, som redan nämnts, även SKI i sin granskning av Fud-program 2001.

Resultatet av dessa överväganden blev åtaganden från SKB att finansiera forskning som rör separation vid institutionen för kärnkemi, CTH och som rör transmutation vid institutionen för kärn- och reaktorfysik vid KTH. För att nå en effektiv nivå ansågs det som ett minimum att man på vardera stället hade ett par doktorander plus viss handledning samt goda möjligheter till internationella kontakter. Senare gick SKB också in som delfinansiär tillsammans med kraftföretagen och SKI med flera för forskning kring kärndata vid Uppsala universitet. Tillgång till grundläggande kompetens på kärndataområdet är nödvändig för all kärnteknisk verksamhet inom landet.

SKB:s budget för insatser inom separation och transmutation har under de senaste åren varit cirka fem miljoner kronor per år – för 2004 är den 5,2 miljoner kronor. Den insats som SKB till större delen finansierat har också inneburit att de tre grupperna kunnat etablera ett brett internationellt samarbete inom och utom EU. Detta har i sin tur gjort att ytterligare projekt och finansiering erhållits inom ramen för EU-programmen. Denna uppgår de senaste åren till sammanlagt

cirka tre miljoner kronor per år. SKB håller med om SKI:s bedömning att de medel som SKB anslår till forskning över separation och transmutation inte bör minska under nuvarande nivå. Å andra sidan är det svårt att i nuvarande läge finna starka motiv för en ökning av insatserna. Bedömningen av i vilken riktning och i vilket takt utvecklingen kommer att gå är fortfarande oklar och mycket osäker. Inom EU:s sjätte ramprogram planeras en relativt omfattande studie av en europeisk experimentanläggning med ADS. Vidare kommer det stora franska programmet under 2006 troligen att undergå en grundlig utvärdering enligt den särskilda lagen från 1991. Dessa händelser kan möjligen leda till en klarare bild om den framtida utvecklingen. Det synes inte rimligt att i nuvarande läge besluta om någon ökning av de svenska insatserna inom separation och transmutation.

SKB avser att fortsätta bedriva inhemsk forskning vid universitet och högskolor i ungefär nuvarande omfattning. Syftet med forskningen ska i första hand vara att medverka till att grundläggande tekniska frågor kring separation och transmutation klarläggs. Särskilt bör inriktningen vara mot frågor om säkerhet, material, processutformning och avfallsströmmarnas sammansättning. Därigenom skapas inhemsk kompetens och SKB får ett underlag för att bedöma utsikterna för och egenskaperna hos system för separation och transmutation. Arbetena sker också i fortsättningen i nära kontakt med den internationella utvecklingen på området.

SKB ser också som en möjlighet att på lämpligt sätt, vid lämplig tidpunkt och i lämplig omfattning medverka i internationella projekt – särskilt EU-projekt – som kan komma till stånd.

23.2 Deponering i djupa borrhål

Vid förvaring av använt kärnbränsle i djupa borrhål deponeras kapslar med använt kärnbränsle på mellan två och fyra kilometers djup. Berget utgör den viktigaste barriären för att isolera avfallet. På två till fyra kilometers djup antas grundvattenförhållandena vara mycket stabila. De eventuella grundvattenrörelser som förekommer förväntas ske på stort djup utan kontakt med markytan. Därmed skulle inte några radionuklider kunna transporteras upp till markytan, men detta återstår att visa.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKB har tidigare utrett vilken omfattning och innehåll ett Fud-program bör ha för att man till sist ska kunna bedöma konceptet djupa borrhål på likvärdiga grunder som KBS-3 /23-21/. Utredningen visade att det skulle ta drygt 30 år och kosta fyra miljarder kronor att nå samma kunskapsnivå som för KBS-3. De geovetenskapliga insatserna styr programmets totaltid. Utvecklingen av borrhåsteknik innehåller stora osäkerheter och skulle kunna försena programmet ytterligare och även öka kostnaderna. SKB:s bedömning är att det inte finns något som talar för att säkerheten ökar eller kostnaderna minskar om det använda kärnbränslet i stället förvaras i djupa borrhål. Det finns därför ingen anledning att genomföra programmet. Resurserna bör i stället koncentreras på att i en nära framtid realisera ett förvar baserat på KBS-3-metoden.

SKI säger i sin granskning att behov och omfattning av en säkerhetsanalys av konceptet med djupa borrhål borde diskuteras inom ramen för det samråd mellan SKB och myndigheterna som regeringen beslutat om 1996 och 2001.

SSI menar att en redovisning som bland annat omfattade en säkerhetsanalys av djupa borrhål skulle kunna motsvara kravet på alternativredovisning som står omnämnt i miljöbalken.

Kasam, å sin sida, delar SKB:s uppfattning att det saknas tillräckliga skäl att genomföra det skisserade Fud-programmet för djupa hål. Man anser att det finns starka skäl för den nuvarande inriktningen av det svenska kärnavfallsprogrammet, det vill säga fortsatt utvecklingsarbete med inriktning på direktdeponering enligt KBS-3-metoden.

Kasam framhåller att deponering i djupa hål inte är en sådan realistisk metod som krävs i miljökonsekvensbeskrivningarna enligt miljöbalken. Alternativ till KBS-3-metoden, som ska redovisas enligt miljöbalken, bör sökas inom kategorin ”byggda förvar inom den översta kilometern”.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

En litteraturstudie har nyligen genomförts för att komplettera tidigare insamlad geovetenskaplig information om förhållandena på djupet i jordskorpan /23-22, 23-23/. Inriktningen har varit densamma nu som tidigare, det vill säga att ge underlag till att bedöma möjligheten av att deponera radioaktivt avfall i fyra kilometer djupa vertikala borrhål. Uppdateringen har gjorts med geovetenskaplig information, som kommit ut i den öppna litteraturen efter 1997, och tyngdpunkten har lagts på kristallint berg för att ha bäring på SKB:s förvarskoncept.

Av litteraturen framgår att de vetenskapliga undersökningarna i existerande djupa borrhål i världen har fortsatt. Exempel på detta är KTB Field Laboratory i Tyskland och Kola SG-3 Deep Geolaboratory i Ryssland. Det borras också nya djupa borrhål, till exempel det geotermiska borrhålet i Skåne ner till cirka fyra kilometer, varav cirka två kilometer i underliggande kristallint urberg.

I kristallint berg förväntar man sig allmänt sett att sprickfrekvens, hydraulisk ledningsförmåga och porositet ska minska med djupet på grund av de ökande bergspänningarna. På fyra kilometers djup kan man förvänta sig att grundvattencirkulationen i det närmaste upphör, att hydrauliska förhållanden kan betraktas som statiska och att diffusion är den dominerande mekanismen för masstransport. En ytterligare bidragande orsak till detta skulle vara de ökande salthaltgradienter med djupet som vanligen observeras. Inte sällan påträffas saltlösningar med en koncentration man kan beteckna som brine. Det salta vattnets högre täthet borde hämma vertikal cirkulation av rent fysikaliska orsaker. På ännu större djup har petrologer hävdat att fritt vatten sannolikt saknas. Geokemiska reaktioner under lång tid kan förväntas ha konsumerat det fria vattnet. Det är viktigt att konstatera – efter den genomförda litteraturstudien – att denna förenklade bild av hur förhållandena på stora djup borde vara inte får något fullständigt stöd av de studier som utförts i de djupa borrhålen på Kolahalvön i Ryssland och i Tyskland /23-23/.

Litteraturstudien sammanfattar de nyaste resultaten och drar en serie allmänna slutsatser om vad detta innebär för deponering i djupa borrhål. När det gäller termiska egenskaper är det uppenbarligen svårt att uppskatta temperatur och värmeledningsförmåga på stora djup, särskilt om berggrunden har en heterogen sammansättning. Hydrauliskt sett tyder mycket av informationen på nära nog stagnanta förhållanden i grundvattnet på stora djup och att de höga salthalterna bidrar till detta. Samtidigt finns det emellertid observationer som indikerar att relativt snabba transporter av lösningar kan vara möjliga även i miljöer med brine-koncentration /23-24/. Påståenden om att det förekommer flöde och transport över stora avstånd nere på flera kilometers djup kan därför vara svåra att motbevisa. Detta är av speciellt intresse för SKB:s vidkommande eftersom berget skulle vara en viktig barriär i ett koncept med förvaring i djupa hål.

Förekomst av bakterier på stora djup diskuteras också i rapporten /23-23/. Man räknar inte med att temperaturen på det aktuella djupet fyra kilometer ska överstiga 115 °C och därmed skulle bakteriellt liv vara fullt möjligt. Någon steril miljö kan man således inte räkna med.

Program

SKB kommer att fortsätta följa utvecklingen inom området djupa borrhål. För fyra år sedan gjorde den tyska firman Deutag på uppdrag av SKB en genomgång av de tekniska förutsättningarna för konceptet djupa hål /23-25/. Den genomgången kan eventuellt förnyas under nästa treårsperiod, men det behöver diskuteras, ty nyttan av ytterligare sådana studier är begränsad.

Del IV

Låg- och medelaktivt avfall

24 Rivning

25 Låg- och medelaktivt avfall

24 Rivning

De anläggningar som omfattas av SKB:s Fud-program är de svenska kärnkraftverken samt SKB:s egna anläggningar. När det gäller omhändertagande av radioaktivt avfall så tillkommer avfallet från Studsvik, Bränslefabriken i Västerås, Ranstad och sist men inte minst Ågesta-reaktorn. Kostnaderna för omhändertagande av radioaktivt avfall från dessa leverantörer ingår inte i de medel som avsätts till kärnavfallsfonden, utan fonderas och betalas separat. I det följande diskuteras SKB:s insatser för rivning av de svenska kärnkraftverken i Oskarshamn, Barsebäck, Ringhals och Forsmark.

24.1 Planering

Tidsplanen för rivning av kärnkraftverk är inte fastlagd. Kraftföretagen bedömer att drifttiden för reaktorerna kan komma att uppgå till 60 år eller mer. SKB:s planering och kostnadsuppskattningar i Plan 2004 bygger på att kraftverken drivs i 40 år för att därefter rivs så snart som möjligt. Den slutliga planeringen för att bygga, driva och slutligen avveckla och riva SKB:s anläggningar sker utifrån planeringen vid kärnkraftverken. Övriga anläggningar rivs så att de i tiden passar in i dessa planer. De finansieras utanför finansieringslagen och arbetet med dessa anläggningar belastar inte kärnavfallsfonden.

Kostnaden för att riva kärnkraftverk uppdateras årligen bland annat baserat på den kunskap och de erfarenheter som successivt erhålls från egna studier och genom att följa den internationella utvecklingen. En detaljerad uppskattning av rivningskostnaderna återfinns i SKB:s årliga Planrapport /24-1/.

Dagsläget

Innehavare av kärntechniska anläggningar är skyldiga att se till att anläggningarna rengörs och rivs i tillräcklig omfattning då de har tjänat ut. Några specifika föreskrifter som reglerar detta finns inte i dag utan bedömningar görs av myndigheterna (SSI och SKI) från fall till fall. Hittills har det inte varit aktuellt med något mer omfattande rivningsprojekt i Sverige. I och med att Barsebäck 1 stängdes 1999 har dock planeringen för en framtida rivning tagit mer konkreta former.

Ansvarsfördelningen mellan SKB och delägarföretagen är sådan att SKB genomför generella rivningsstudier och säkerställer att teknik och kompetens finns, och att kostnaderna bedöms på ett korrekt sätt. Kraftverken ansvarar för planering, tillstånd och genomförande av rivning av egna anläggningar. Avfallets omhändertagande samordnas med SKB. SKB bevakar utvecklingen inom rivningsområdet i utlandet, bland annat genom att delta i internationella organisationers rivningsstudier men också genom direktkontakt med olika rivningsprojekt som kan vara av värde för planeringen i Sverige.

Erfarenheterna vi har i dag i Sverige när det gäller rivning inskränker sig till små forskningsanläggningar som har rivits. Den största är forskningsreaktorn R1 på Drottning Kristinas väg i Stockholm. I Studsvik pågår sanering av ACL (Aktivt Centrallaboratorium) och erfarenheter från detta arbete tar SKB del av.

Rivningslogistik

De svenska kärnkraftverken är tagna i drift under en relativt kort period. Det äldsta är från 1972 och de yngsta från 1985. Med antagandet att livslängden för de olika kraftverken är lika lång kommer avställning att ske under en trettonårsperiod. Ett undantag från detta är stängningen av Barsebäck 1, som genomfördes 1999 trots att en betydande del av den tekniska livslängden för anläggningen återstod.

När ska rivning av ett avställt kärnkraftblock genomföras? Internationell erfarenhet visar på en uppsjö av varianter. Allt från omedelbar och fullständig rivning till att endast ställa anläggningen i viloläge (malpåse) på obestämd tid. Orsakerna till detta är många och det sätt som väljs måste anpassas till rådande förutsättningar. I Sverige förutsätts rivning ske relativt snart efter avställning och borttransport av det använda bränslet. Detta är också den trend som kan skönjas internationellt. Skälen till att genomföra en tidig avveckling och rivning skiljer mellan länder. Det kan till exempel vara att det finns ett behov av att använda platsen för annan verksamhet. Andra skäl kan vara att man vill utnyttja den kompetens som finns vid anläggningen eller att man vill demonstrera att rivning av anläggningen kan genomföras på ett säkert och ekonomiskt sätt.

Rivning antas ske efter en relativt grundlig dekontaminering (rengöring) av anläggningens processsystem. Detta görs för att reducera strålningen till rivningspersonalen. Om anläggningen redan från början har låga strålningsnivåer kan denna systemdekontaminering eventuellt uteslutas. Detta är en bedömning som får göras för varje kraftverksblock från Alara-synpunkt. När rivningen genomförs antas i SKB:s studier att systemrivning sker först och att denna tar minst tre år. Därefter saneras byggnader och kontaminerade byggnadsdelar rivs. Sist sker rivning av de konventionella inaktiva systemen och byggnaderna. Detta beräknas ta cirka två år, varefter anläggningsplatsen återställs till industriområde för annan verksamhet. En total rivningstid på cirka sex år efter att bränslet transporterats bort, vilket tar ungefär två år, bedöms tillsammans ge kortast möjliga avvecklingsperiod.

24.2 Teknik för rivning

Här finns en hel del gjort, främst i utlandet, men teknikstudier genomförs även i SKB:s regi och successivt kommer även kraftbolagen att genomföra studier i syfte att planera inför rivning av de egna anläggningarna. Genom de rivningsprojekt som genomförts och genomförs i olika länder har visats att teknik finns för rivning och omhändertagande av avfallet från alla typer av kärntekniska anläggningar. Det som återstår att göra är en optimering och anpassning av befintlig teknik så att bästa möjliga förutsättningar uppnås för rivning av de svenska kärnkraftverken.

De teknikstudier som SKB genomför avser att utifrån teknik som i dag existerar, och tillämpas, redovisa ett möjligt scenario för rivning av svenska kärnkraftverk. Med den valda tekniken som bas görs även en uppskattning av vilka tider, kostnader och avfallsmängder som är förknippade med rivningen.

När ett kärnkraftverk har tagits ur drift ska området återställas så att det kan användas för annan industriell verksamhet, utan radiologiska begränsningar. Detta ska genomföras på ett sådant sätt att varken personalen, som är sysselsatt med nedläggnings- och rivningsarbetet, eller allmänheten utsätts för onödig bestrålning.

Projektering och tillståndsprocess för slutförvaring av det radioaktiva avfallet från rivningen kräver en för landet gemensam planering. Planeringen ska ske i samarbete mellan kraftbolagen och SKB. Planeringen ger fördelar när det gäller till exempel tillgång till specialutrustning, specialutbildad personal och möjlighet till erfarenhetsåterföring. Utgångspunkten för planeringen är att ingen rivning av ett block genomförs så länge drift pågår i ett närliggande block. Sammantaget innebär detta att den första rivningen inte påbörjas förrän någon gång efter år 2015 och troligen inte förrän en bit in på 2020-talet. Vid förlängd drifttid hos kärnkraftverken, eller om kraftbolagen väljer att låta strålningen från reaktorn avklinga en tid, påbörjas rivningen vid motsvarande senare tidpunkt.

Det är kraftföretagen som har huvudansvaret för planering och genomförande av den fysiska rivningen. I deras ansvar ingår även att fastställa vilken strategi som ska tillämpas beträffande tidpunkt för rivningen och den teknik som ska användas. Behandling av det radioaktiva avfallet ska planeras och genomföras i samarbete med SKB.

SKB har ansvaret för att ta hand om det radioaktiva avfallet (det icke radioaktiva avfallet tas om hand av kraftbolagen) som uppstår vid rivningen. För detta behöver transportsystemet anpassas och slutförvar byggas. Det kortlivade rivningsavfallet ska enligt planerna deponeras i en utbyggnad till SFR. Det avfall som suttit nära reaktorhärden är kraftigt neutronbestrålat och betraktas som långlivat. Detta avfall ska först mellanlagras innan det får sin slutliga deponering i ett förvar liknande SFR men på större djup. Det kan byggas i anslutning till SFR eller djupförvaret för använt bränsle. Ett tredje alternativ är att bygga slutförvaret för långlivat avfall på en egen plats.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Det finns inget i granskningen av Fud 2001 som indikerar att någon myndighet har invändningar mot de metodbeskrivningar som SKB lämnat avseende rivning. Tvärtom påpekas att arbetet sker på ett ambitiöst sätt. Myndigheterna konstaterar, liksom SKB, att det finns teknik i dag för rivning som kan anpassas till svenska förhållanden.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Erfarenheter från utveckling av tekniker för rivning erhålls successivt från de internationella grupper som SKB och kraftföretagen deltar i. Teknikutveckling i Sverige för ombyggnader och modifieringar i kraftverken ger goda erfarenheter vid planering för avveckling av kraftverken. Nyvetenskap sedan Fud 2001 sammanfattas i /24-2/.

24.3 Avfall från rivning

Den största mängden avfall, som erhålls vid rivning av ett kärnkraftverk, utgörs av konventionellt byggnadsmaterial som inte är radioaktivt.

Av det radioaktiva materialet är en stor del mycket lågaktivt. Genom rengöring och/eller smältning kommer en hel del att kunna återanvändas. Hur mycket beror dels på hur säkra mätmetoder som finns, dels på vilka regler för denna friklassning som tillämpas. I dag finns inga generella regler för friklassning av material från rivning utan myndigheterna avgör detta från fall till fall, eftersom några större rivningsprojekt ännu inte påbörjats. För små kvantiteter finns regler för utförelse från kärnkraftverken.

Det avfall som inte friklassas ska tas omhand i särskilda slutförvar. Det kortlivade avfallet ska enligt planerna deponeras i en utbyggnad till SFR. Denna utbyggnad ska genomföras så att den första etappen står färdig när rivning av kraftverken börjar. Ett slutförvar för det kortlivade avfallet behövs inte förrän tidigast år 2020, se figur 25-1.

Långlivat avfall från rivning består främst av de interna reaktordelar som under drift utsatts för betydande neutronbestrålning. Dessa utgör en liten volym (förpackat mindre än 1 000 m³ för ett kraftverk) men behöver tas om hand separat. De är dels kraftigt strålande och kräver därför extra strålskärning, dels innehåller de betydande mängder långlivade radionuklider som gör att de bör slutförvaras på större djup än det kortlivade avfallet. SKB planerar att mellanlagra detta avfall tills dess att merparten av alla kraftverk har rivits. Därefter deponeras avfallet i ett särskilt förvar, som avses byggas till exempel vid SFR men på ett större djup. I detta förvar kommer även det långlivade avfallet från forskning med mera som förpackas och mellanlagras i Studsvik att slutligt deponeras.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser det rimligt att begära att alla typer av rivningsavfall ska kunna tas om hand från år 2015. Det långlivade avfallet riskerar enligt SKI att bli en flaskhals om inte projektering för mellanlagring snarast påbörjas. Utveckling av ett, till Clab alternativt system, för mellanlagring av det långlivade avfallet från rivning bör enligt SSI ges prioritet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Det kortlivade avfallet från rivning av kärnkraftverk kommer att slutförvaras i en utbyggnad till SFR som ska vara färdig innan ett mera omfattande rivningsprogram startar. Detta beräknas ske tidigast omkring år 2020. Det är kraftföretagen som har det övergripande ansvaret för att införskaffa de tillstånd som krävs och att planera för den egna rivningen.

Sedan Fud 2001 har bland annat nedanstående aktiviteter genomförts:

- Utveckling av metod för torr mellanlagring av hårdkomponenter som alternativ till bassänglagring i Clab.
- Upprättande av sammanhållet register över dokumentation inom rivningsområdet.
- Införande av system för registrering av avfall avsett för slutförvaring i framtida förvar för låg- och medelaktivt avfall.

24.4 Program

De övergripande målen för SKB:s insatser inom rivningsområdet är att:

- Säkerställa att kunskap och teknik för rivning finns utvecklad i god tid innan detaljplanering av rivningsarbetet påbörjas. Det är dock de kärntekniska anläggningarna själva som ansvarar för att erforderliga tillstånd finns och för att genomföra rivning av de egna anläggningarna.
- Genom kostnadsberäkningar ge underlag för behov av att fondera medel för rivningen.
- Säkerställa att det radioaktiva avfallet från rivning kan tas omhand, transporteras och slutförvaras.

Målen uppfylls genom att dels följa den internationella utvecklingen och att överföra dessa erfarenheter till de svenska förhållandena, dels genom att genomföra egna studier och följa de ombyggnads- och reparationsarbeten som genomförs i de svenska anläggningarna.

Ett slutförvar för det kortlivade avfallet ska vara färdigt att ta emot avfall när rivning påbörjas i större omfattning. Planeringen är att göra en utbyggnad av SFR och i samband därmed licensiera hela anläggningen för kortlivat avfall från såväl drift som rivning. Slutförvaring av de långlivade hårdkomponenterna planeras ske i ett senare skede, då huvuddelen av de svenska kärnkraftverken har rivits. Detta innebär att avfallet måste mellanlagras en tid. I dag finns möjlighet till detta i Clab, men en utbyggnad av Clab krävs troligen om allt långlivat rivningsavfall ska mellanlagras där. SKB har därför studerat alternativa mellanlagringsalternativ.

För den kommande sexårsperioden kommer den huvudsakliga inriktningen att vara:

- Utredningar avseende deponering av hela reaktortankar och andra stora komponenter. Det bör vara möjligt till besparingar såväl i form av minskad dosbelastning som i tidsvinst men konsekvenserna för transport och deponering behöver studeras.
- En uppdatering av de rivningsstudier som historiskt har gjorts genomförs och belyser olika frågor med dagens kunskap. En mer omfattande, total, rivningsstudie genomförs.
- Uppskattning av dosbudget för rivning av kärnkraftverk.
- Omhändertagande av inaktivt avfall (mängder, förvaring, återanvändning).
- Översyn av rivningslogistiken. Se över konsekvenserna av att förlänga driften från 40 till 60 år. Planera för avvecklingen med hänsyn till att resurserna för avveckling kommer att vara begränsade.
- Preliminära säkerhetsanalyser genomförs av slutförvar för kortlivat avfall (samordning av slutförvar för avfall från drift med slutförvar för kortlivat avfall).
- Arbete med en preliminär säkerhetsbedömning av den långsiktiga säkerheten vid slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall påbörjas i slutet av perioden.

25 Låg- och medelaktivt avfall

Huvuddelen av avfallet från driften och rivningen av kärnkraftverken är kortlivat och låg- och medelaktivt. Vid driften och rivningen av kärnkraftverken uppkommer även långlivat låg- och medelaktivt avfall.

25.1 Loma-systemets ingående komponenter

Systemet för att ta hand om låg- och medelaktivt avfall, Loma-systemet, omfattar allt radioaktivt material från kärnkraftverken, med undantag för det använda bränslet. Det material som är så lågaktivt att det kan deponeras på kraftverkens interna markdeponier ingår inte heller.

Loma-systemet kan även omfatta det radioaktiva avfall som erhålles från verksamheten i Studsvik eller avfall från övrig användning av radioaktivt material vid till exempel forskning och utbildning och vid sjukhus och i industrin. Detta ligger emellertid utanför SKB:s åtagande gentemot ägarna och kräver att egna avtal tecknas. Avfallet kan behandlas och förpackas vid kraftverken och vid Studsvik. Det institutionella avfallet tar Studsvik hand om.

SKB:s anläggningar för låg- och medelaktivt avfall omfattar i dag slutförvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken (SFR), mellanlager för medelaktivt långlivat avfall, hårdkomponenter, i Clab samt transportsystemet för Loma (Sigyn med avfallstransportbehållare, ATB).

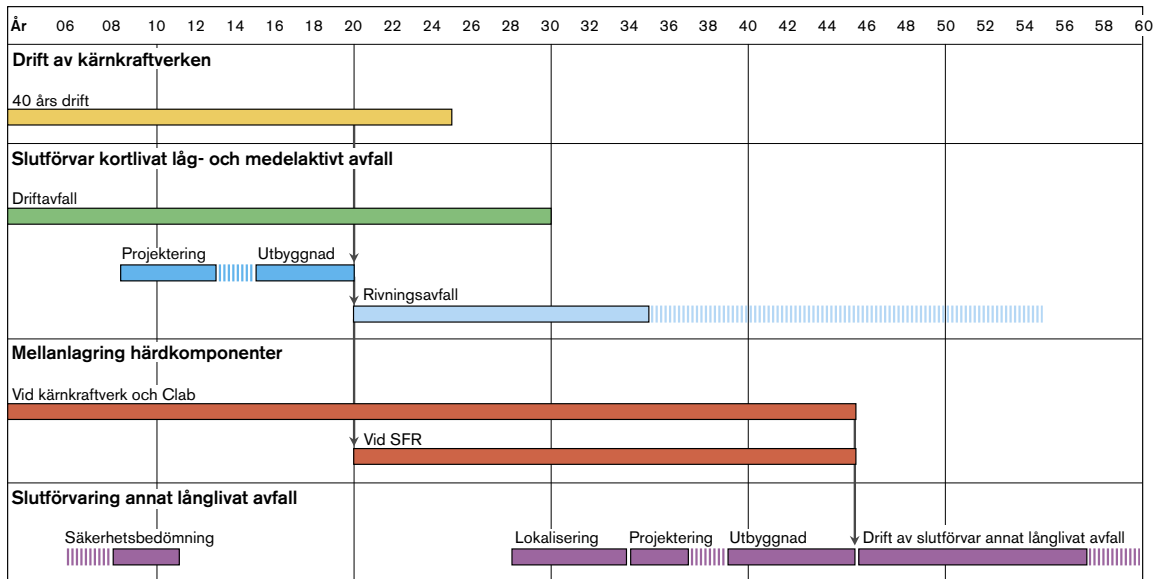
Loma-systemet kommer senare att kompletteras med slutförvar för radioaktivt avfall från rivning av de svenska kärnkraftverken samt avveckling av övrig kärnteknisk verksamhet.

Det kortlivade avfallet från rivning av kärnkraftverken planeras bli deponerat i en utbyggnad av SFR-1. I samband med utbyggnaden avses man att göra en omDispositionering så att hela SFR-anläggningen kan utnyttjas för optimal deponering av avfall från såväl drift som rivning.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall mellanlagras i dag i Clab, vid kärnkraftverken och i Studsvik. Det långlivade avfallet har än så länge en relativt liten volym, men kommer att öka i samband med rivning av kärnkraftverken. Även en förlängd drifttid kan förmodas ge ökade volymer från underhåll och reparation. Därför planerar SKB för en torr mellanlagring av hårdkomponenter som en avlastning av Clab.

Slutförvaret för annat långlivat avfall planeras stå färdigt för att ta emot avfall omkring år 2045, när större delen av avfallet finns tillgängligt för deponering, se figur 25-1.

SKB:s verksamhet på området låg- och medelaktivt avfall finansieras delvis med pengar från kärnavfallsfonden (förvaret för rivningsavfall och förvaret för annat långlivat avfall) och är delvis finansierad direkt från delägarna (befintligt förvar för kortlivat driftavfall). De delar av SKB:s verksamhet på det här området som kan hänföras till Studsviks verksamhet och övriga avfallsleverantörer finansieras i särskild ordning.



Figur 25-1. Översiktlig tidsplan för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall, inklusive avfall från rivning av kärnkraftverken.

25.2 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall avser i dag avfall från drift och underhåll av kärnkraftverken. Detta avfall är väl karakteriserat och hanteras rutinmässigt sedan närmare 30 år. Deponering av den del som SKB ansvarar för sker i SFR sedan 1988. I framtiden, när utvecklingen av kärnkraftverken påbörjas, tillkommer avfall från rivningen. Detta avfall utgörs av samma typer av avfall som uppstår vid drift och underhåll av kärnkraftverken, men med annan fördelning mellan de olika avfallstyperna. De kommer att kunna behandlas, transporteras och deponeras på samma sätt som driftavfallet. Rivningsavfallet domineras av metallskrot och betongrester.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Vid granskning av Fud 2001 framkom önskemål om bättre belysning av hur avfallet från rivning ska hanteras, särskilt de stora mängder lågaktivt avfall som förväntas.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2001

SKB eftersträvar en mer sammanhållen planering och hantering av frågor som rör låg- och medelaktivt avfall. Detta sker bland annat genom återkommande avfallsprognoser samt nya och uppdaterade studier avseende mängder och typer av avfall.

När det gäller hantering av Loma så ligger SKB:s ansvar på det avfall som ska tas om hand i SKB:s anläggningar. Övrigt avfall, till exempel friklassat material samt lågaktivt material som avses deponeras på kraftverksområdet, är också kraftverkens ansvar. Genom samarbete mellan SKB och kraftbolagen belyses helheten och optimala lösningar kan tas fram.

Program

Se avsnitt 25.5.

25.2.1 Förvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Slutförvaring av kortlivat låg- och medelaktivt avfall sker i dag i SFR. När avveckling av kärnkraftverken kommit så långt att rivning påbörjas ska SKB ha ett slutförvar för det kortlivade avfallet färdigt att ta emot avfall. Detta förvar planeras bli en utbyggnad av SFR. En utbyggnad för driftavfall blir aktuell i mitten av 2020-talet om kärnkraftverken i större omfattning drivs längre än 40 år.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Myndigheterna anser det rimligt att slutförvar för rivningsavfall ska stå färdigt år 2015.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Den avvecklingsplanering som i dag tillämpas indikerar att rivning i större skala inte kommer att ske förrän tidigast efter år 2020. I samband med utbyggnad av SFR för rivningsavfall avser SKB att licensiera om anläggningen så att den kan hysa kortlivat avfall, oavsett om det kommer från drift eller avveckling (rivning).

Program

Se avsnitt 25.5.

25.2.2 Säkerhetsbedömning

Ingen formell säkerhetsanalys har genomförts för slutförvaret för kortlivat rivningsavfall sedan den preliminära säkerhetsanalysen för SFR, 1982. Avsikten är att genomföra en ny preliminär säkerhetsbedömning under perioden. En säkerhetsanalys kommer att inlämnas i samband med att en preliminär säkerhetsrapport för det utbyggda slutförvaret för kortlivat rivningsavfall tas fram omkring år 2013.

25.3 Långlivat låg- och medelaktivt avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet består i huvudsak av två kategorier:

- Långlivat avfall från forskning, sjukvård och industri.
- Härdkomponenter och vissa av reaktorernas interna delar (kraftigt neutronbestrålade) från underhåll och rivning av kärnkraftverken.

Den första kategorin förpackas och mellanlagras i ett särskilt bergrum i Studsvik i kokiller eller fat för att sedan deponeras. Materialet från kärnkraftverken mellanlagras i dag i förvaringskassetter i Clab, alternativt vid kärnkraftverken. Den slutliga förpackningen görs i samband med deponeringen.

Vid rivning av kärnkraftverken kommer större mängder långlivat skrot (interna delar och härdkomponenter) att uppstå. Alternativ till mellanlagring i Clab kommer att undersökas.

En inventering av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet som finns och som förväntas uppstå gjordes 1998 som underlag för den preliminära säkerhetsbedömningen av ett slutförvar för annat långlivat avfall, som genomfördes året därpå /25-1/. Den totala volymen av långlivat låg- och medelaktivt avfall från Studsvik uppskattades till 1 850 m³. Härdkomponenter och interna delar från kärnkraftverken beräknades till totalt 7 800 m³ för kokvattenreaktorerna och 1 800 m³ för tryckvattenreaktorerna. Volymerna är beräknade från yttermått på de avfallskollin som antingen redan finns eller kommer att produceras.

Ett system för dokumentation av det långlivade avfallet har utvecklats av SKB. Systemet liknar det för SFR-avfall, men tar dessutom hänsyn till att dokumentationen sker successivt. Det senare föranleds av att avfallet i vissa fall lagras som råavfall under en längre tid innan det får sin slutliga form för deponering.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI konstaterar att det är rimligt att fokusera arbetet på radionukliderna som bidrar mest till beräknad dos, som till exempel klor-36 och molybden-93, men att det ska finnas beredskap för att studera även andra nuklider som kan bli viktiga vid nästa säkerhetsanalys.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet kommer att följas upp av SKB på liknande sätt som avfallet som ska till SFR. Därigenom kommer vi med tiden att få en bättre bild av inventariet av radionuklider i avfallet.

Studier har bedrivits vid institution för kärnfysik vid Lunds Universitet på uppdrag av SKB för att sänka detektionsgränsen för nickel-59 i stålmaterial. Tidigare mätmetod har utvecklats främst med avseende på provberedning. Detektionsgränsen har sänkts med en faktor 20 mot tidigare nivå. Under senare år har mätningar utförts på både stålmaterial från BWR-reaktorer och reaktorvatten från PWR-reaktorer.

På samma institution vid Lunds Universitet har projekt påbörjats för att mäta kol-14 i jonbyttarmassor från svenska reaktorer. Tidigare har kol-14 mätts i grafit från den rivna forskningsreaktorn från KTH i Stockholm. Litteraturstudier har bedrivits i syfte att identifiera lämpliga mätmetoder för kol-14-mätningar i jonbyttarmassor.

SKB har också låtit utföra mätningar av klorinnehåll i stålmaterial vid Imperial College i London. Syftet med dessa mätningar har varit att säkrare beräkna innehållet av klor-36 i stålmaterial från de svenska reaktorerna. Detektionsgränserna vid de aktuella mätserierna varierade mellan 0,14 och 1,5 mg/kg (ppm). Flertalet av proverna som analyserades låg under aktuella detektionsgränser. Projektet innebar att en tidigare metod för rening av prover fick vidareutvecklas för att undvika påverkan på klorinnehållet i de fall då proverna innehöll mängder av molybden och wolfram.

Program

Se avsnitt 25.5.

25.3.1 Slutförvar för annat långlivat avfall

En layout till slutförvaret för annat långlivat avfall togs fram 1996. Detta förvar skulle kunna ta emot långlivat låg- och medelaktivt avfall /25-1/.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Myndigheterna /25-2/ konstaterar att det saknas en sammanhängande redovisning för designstudier och konstruktionskrav samt krav som måste ställas på en tänkbar kandidatplats för att motsvara kraven som ställs på utformningen av slutförvaret för annat långlivat avfall.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

SKB har inte gjort några nya studier med den här inriktningen.

Program

Arbete med förvarets utformning, och därmed sammanhängande krav på en tänkbar kandidatplats, kommer att återupptas i samband med förberedelserna inför en ny säkerhetsrapport för slutförvaret för annat långlivat avfall. För närvarande planeras detta att påbörjas i slutet av detta årtionde. Se även avsnitt 25.5.

25.3.2 Säkerhetsanalysen

En första förenklad säkerhetsanalys av ett slutförvar för annat långlivat avfall genomfördes 1999 /25-1/.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

Säkerhetsanalysen granskades ingående av SKI och SSI med hjälp från en grupp av internationella experter. Slutsatserna av såväl expertgruppens som myndigheternas granskning har rapporterats /25-3, 25-4/. Både myndigheterna och expertgruppen drar slutsatsen att mycket utvecklingsarbete återstår innan kunskapsnivån inom området blir jämförbar med den nuvarande för djupförvaret för använt bränsle.

I granskningen av Fud 2001 påpekar SKI också att redovisningen av vad som kommer att ingå i den kommande säkerhetsanalysen är knapphändig och svår att bedöma, samt att SKB behöver uppdatera (den tidigare) säkerhetsanalysen, och att arbetet bör påbörjas omgående så att SKB efter genomförandet av platsundersökningarna kan ta fram en förnyad säkerhetsanalys.

SKB:s planer, som presenterades redan i Fud 2001, innebär att förvaret ska lokaliseras och byggas först om drygt 30 år och att vi vill utnyttja tiden till att göra nödvändiga forsknings- och utvecklingsinsatser.

Nyvetenskap sedan Fud 2001

Det har inte gjorts någon ny säkerhetsanalys utan arbetet har fokuserats på forskning och utveckling, se vidare 25.4.

Program

Efter platsundersökningarna kommer det att finnas tid och underlag för en ny säkerhetsanalys. Att undersökningarna är inriktade på förvaret för använt kärnbränsle saknar större betydelse, eftersom det i princip är samma typ av platsdata som behövs. Den exakta tidpunkten för en ny säkerhetsanalys väljs med hänsyn till övriga säkerhetsanalyser och resurser. Figur 25-1 visar att enligt nuvarande planering ska en säkerhetsbedömning inlämnas till SKI och SSI år 2011, se även avsnitt 25.5.

25.4 Forskningen

De undersökningar som görs syftar främst till att ta fram data och modeller för att analysera den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar för annat långlivat avfall. Kunskapen byggs upp dels genom den forskning som SKB stöder och dels genom att vi tar del av internationella utredningar på området. Vi har funnit att bland de viktigaste processerna, som kan påverka barriärernas egenskaper på lång sikt, finns följande:

- Korrosion av stål och aluminium i betongmiljö (bildning av gas och korrosionsprodukter).
- Betongdegradering i salta vatten.
- Reaktioner mellan lakningsprodukter från cement (högt pH) och omgivande grusfyllning.

- Utfällning av kalcit och brucit (kalciumkarbonat och magnesiumhydroxid).
- Alkalisk nedbrytning av cellulosa i avfallet (bildning av komplexbildare).
- Mikrobiell och alkalisk nedbrytning av annat organiskt material i avfallet.
- Uppbyggnad av gasövertryck i avfallskollin och inbyggnad av betong.
- Påverkan av organiska tillsatsmedel i cement på radionuklidsorption.
- Sorptionsegenskaper hos färsk och åldrad betong.
- Betydelsen av isotoputbyten och samfällning för fördröjning av lågsorberande radionuklider.

Interna metalldelar från reaktorerna utgör en väsentlig del av avfallet. En del radionuklider finns i crud på ytan av kontaminerade metalldelar, men större delen av aktiviteten utgörs av inducerad aktivitet. Då måste metallen först korrodera för att radionukliderna ska bli tillgängliga. Den vanligaste metallen i avfall med inducerad aktivitet är rostfritt stål.

Avfall från forskning innehåller, i motsats till de interna delarna från reaktorerna, en betydande mängd organiskt material.

Radionuklider och även miljöfarliga ämnen, som löst sig i inträngande vatten i avfallskollina, kan transporteras ut genom närzonsbarriärerna med diffusion och med vatten som strömmar genom barriärerna. Uttransporten fördröjs på grund av sorption i cement, betong och återfyllnadsgrus. Sorptionen beror i huvudsak på vattnets sammansättning, där pH, Eh och närvaro av organiska komplexbildare är viktiga parametrar.

Slutsatser i Fud 2001 och dess granskning

SKI anser att det behövs bättre processmodeller som beskriver den långsiktiga degraderingen av betong, där det bland annat borde ingå en mer detaljerad redogörelse för påverkan av salt grundvatten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2001

Nedbrytning av cellulosa till ISA

Cellulosa bryts ner vid höga pH och bildar därvid en relativt stor andel isosackarinsyra, ISA. Den produkten är i sin tur en stark komplexbildare vid höga pH. Eftersom cellulosa är ett vanligt material i låg- och medelaktivt avfall har detta studerats sedan det första gången uppmärksammades för mer än tio år sedan. Fenomenet har nyligen, med stöd av SKB, undersökts ingående vid Paul Scherrer Institut i Schweiz /25-5/ och tidigare i ett doktorsarbete vid Linköpings Universitet /25-6/. ISA bildas i högt utbyte (70–85 procent), men reaktionen stannar av när cirka 20 procent av cellulosan brutits ned. Dessa reaktioner påverkas av temperaturen. ISA sönderfaller i kontakt med kalciumhydroxid, en av komponenterna i cement, och denna reaktion kommer att undersökas närmare.

Sorption av radionuklider i betong

Betongen utgör en viktig barriär mot spridning av radionuklider i ett förvar med låg- och medelaktivt avfall. Konstruktionsbetong är tillräckligt tät för att hindra flöde av vatten, men transport av upplösta radionuklider genom diffusion är möjligt. Trots detta är betongen en effektiv barriär för de flesta radionukliderna i avfallet, eftersom radionuklider sorberas i betongen och därigenom hålls kvar. SKB stöder forskare vid Chalmers Tekniska Högskola och Linköpings Universitet i deras undersökningar av inverkan av isosackarinsyra och andra organiska ämnen på sorption av radionuklider i betong /25-7, 25-8/. En viktig observation är att isosackarinsyran själv sorberas kraftigt i betong, vilket mildrar den effekt komplexbildning med isosackarinsyra kan ha på radionuklidernas rörlighet. Effekten av tillsatsmedel i betong på radionuklidsorption har också studerats vid Paul Scherrer Institut och vid Linköpings Universitet /25-9, 25-10/.

Nedbrytning av betong

Avfallet kommer till stor del att vara inneslutet i behållare av betong. Inbyggnaden med dess återfyllning består också av betong. Betongen är en viktig barriär i närområdet. Även om vi inte tror att betongen kan förhindra att grundvatten tränger in efter förslutning så kommer den att hålla kvar radionuklider, dels genom sin låga hydrauliska konduktivitet och dels genom att sorbera upplösta radionuklider. Därför är det viktigt att förstå hur betong åldras. Att det skulle uppstå en del nya sprickor med tiden är inte så kritiskt. Vi räknar med att konstruktionen kan ha en del sprickor redan från början. Den hydrauliska buren kommer ändå att fungera och den förhärskande transportmekanismen kommer att vara diffusion. Viktigt är dock att strukturen inte helt faller samman eller att dess kemiska egenskaper blir helt förändrade under den tid som förvarets barriärer är viktiga för säkerheten.

Vatten i kontakt med betong kommer att lösa upp en del av de komponenter som ingår i betongen. Detta skulle på lång sikt kunna medföra försämringar. Modeller finns med vars hjälp man kan beräkna utlakningen av betong /25-11/. Det har varit angeläget att pröva dessa modeller. Prover av gammal betong som befunnit sig i vattenmättad miljö har samlats in och undersökts för detta ändamål /25-12, 25-13/. Inget av proverna är visserligen äldre än 90 år, men med mikroskopiska undersökningar kan man ändå följa förändringarna.

Cementanalogi

I projekt Maqarin undersöks hyperalkaliska vatten (pH cirka 12) samt primära och sekundära cementmineral, som finns naturligt i vissa områden i Jordanien. Undersökningarna har pågått sedan 1990 och projektet är nu inne i sin fjärde fas. Flera organisationer i olika länder stödjer projektet. Slutrapporten för fas III kom ut 1998 /25-14/ och slutrapporten för fas IV ska enligt planerna vara färdig under senare delen av 2004. Följande punkter är exempel på värdefulla observationer:

- Mineral som bildas i cementpasta finns kvar i mer än 100 000 år, förutsatt att de hyperalkaliska förhållandena består.
- Hyperalkaliskt vatten reagerar med bergets mineral. Därvid bildas sekundära mineral som tenderar att sätta igen sprickor och hindra vattenflödet.
- Ytorna på de vattenförande sprickorna reagerar med hyperalkaliskt vatten, men porositeten i angränsande berg är fortfarande tillgänglig för indiffusion av lösta ämnen (matrisdiffusion).
- Kolloidkoncentrationerna är låga (som i vanligt djupt grundvatten) och vi ser ingen tendens till produktion av kolloider.
- Lösligheter av olika spårmetaller kan beräknas vid höga pH med hjälp av termodynamiska konstanter, men osäkerheterna är större än annars. I allmänhet är de framräknade värdena dock konservativa.
- Mikrober kan växa och kan vara aktiva under aeroba och anaeroba hyperalkaliska förhållanden, men tillväxten och aktiviteten är mycket låga.
- I Kushaym Matruk (centrala Jordanien) kan man se att illit- och smektitmineralerna är mera amorfa, det vill säga har minskad svällförmåga, nära intill cementgränsen. Högt pH har spridit sig några få meter in i den sedimentära matrisen genom diffusion.

Experiment in-situ

Laboratorieexperiment /25-15/ och observationerna i Jordanien tyder på att vatten från lakning av betong kommer att reagera med bergets mineral. I vetenskaplig litteratur finns mätningar av kinetik för reaktioner mellan mineral (till exempel kvarts eller fältspat) och vatten med mycket högt pH. Man ser att reaktioner kan ske, men att de är känsliga för temperaturen. Av den anledningen görs de flesta experimenten vid högre temperaturer.

För att se hur betongporvatten reagerar med bergmineral i en verklig förvarsmiljö och hur detta kan påverka radionuklider utförs experiment in-situ. SKB deltar tillsammans med Nagra, Andra, JNC och Sandia i projekt HPF (Hyperalkaline Plume in Fractured Rocks) i Grimsel, Schweiz. Simulerat cementporvatten har injicerats i sprickor i berget tillsammans med upplösta radionuklider. Sprickorna kommer att borraras ut och undersökas efteråt. Projektet leds av Nagra. Det startade 1997 och ska pågå till 2004. En spricka har valts ut i underjordsanläggningen i Grimsel, borrhål är borrade och noggrant undersökta. Spårförsök i allmänhet och med radionuklider i synnerhet kräver ingående förberedelser, men resultaten som har framkommit är värdefulla /25-16/. Fältförsöket har stött på särskilda experimentella svårigheter på grund av användningen av högalkaliska lösningar. Laboratorieexperiment och beräkningar har utförts som komplement till fältförsöket /25-17, 25-18/.

Program

Se avsnitt 25.5 nedan.

25.5 Program för låg- och medelaktivt avfall

Många av studierna som rör avfallet är applicerbara på alla kategorier låg- och medelaktivt avfall – både kortlivat och långlivat – eftersom samma material och radionuklider förekommer i alla avfallstyper, i större eller mindre omfattning. Detsamma gäller förpackning och hantering, med den skillnaden att långlivat avfall tills vidare måste förpackas så att det går att omkonditionera om den slutliga utformningen av slutförvaret skulle kräva detta.

Ett slutförvar för det kortlivade rivningsavfallet ska vara färdigt att ta emot avfall när rivning påbörjas i större omfattning. Planeringen är att göra en utbyggnad av SFR och i samband därmed licensiera hela anläggningen för kortlivat avfall från såväl drift som rivning. Slutförvaring av de långlivade hårdkomponenterna kommer enligt planerna i ett senare skede, då huvuddelen av de svenska kärnkraftverken har rivits. Detta innebär att avfallet måste mellanlagras en tid. I dag finns möjlighet till detta i Clab, men en utbyggnad av Clab kan komma att krävas om allt långlivat rivningsavfall ska mellanlagras där. SKB har därför studerat olika alternativ att mellanlagra detta avfall. De övergripande målen för arbetet med låg- och medelavfall för tiden 2005–2010 är att:

- Ta i bruk ett system för torr mellanlagring av hårdkomponenter för att avlasta Clab.
- Förbereda framtida säkerhetsanalyser.
- Utveckla hantering och lagring av avfallet i samarbete med kärnkraftverken.
- Genomföra preliminära säkerhetsbedömningar för slutförvaring av kortlivat drift- och rivningsavfall i SFR.
- Studera förutsättningarna för ett markförvar för mycket lågaktivt rivningsavfall.

Erfarenheterna från säkerhetsanalysen av slutförvaret av annat långlivat avfall och uppdateringen av säkerhetsrapporten för SFR (Safe) har gett oss värdefull vägledning till detta. Vi vet nu vad vi ska fästa avseende vid och vilken typ av information som behöver lagras för att materialet ska kunna användas till framtida redovisningar och säkerhetsanalyser. Dessutom ägnar vi speciell uppmärksamhet åt en del långlivade nuklider som visar sig betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten. För några av dessa försöker vi utveckla metoder att analysera innehållet (med kemi och beräkningar). Ett system för rutinmässig dokumentation av avfallens sammansättning, innehåll av radionuklider och egenskaper håller på att utvecklas på SKB. Dokumentationen kommer att ske på liknande sätt som för övrigt låg- och medelaktivt avfall.

Forskning om processer i förvaren är viktigt för att förbereda framtida säkerhetsanalyser. Många av frågorna som behöver behandlas är av kemisk natur och specifika för det höga pH som betongen alstrar i förvaret och dess närområde. Den planerade verksamheten för tiden 2005–2010 är inriktad på att studera följande:

- Fortsätta studierna av diffusion och sorption av radionuklider i betong och berg vid höga pH. Vi avser inte begränsa oss till att studera aktinider, utan också inkludera aktiveringsprodukter, till exempel aktiverad molybden. En viktig aspekt är inverkan av organiska ämnen på radionuklidsorption vid höga pH, speciellt isosackarinsyra och cementtillsatser.
- Utveckla modellerna för betongnedbrytning, inklusive effekterna av salt vatten.
- Studera reaktionerna mellan lakvatten från betong och det omgivande gruset i förvaret.
- Fältstudier och undersökningar av naturliga analogier till alkaliska betongmiljöer.
- Korrosion av metaller i betongmiljö.

Hittills har vi använt ungefär samma modell som i SR 97 för att beräkna transport av radionuklider i närområdet, men en modell mer anpassad till låg- och medelaktivt avfall hade antagligen varit bättre. Olika vägar till bättre modeller kommer att prövas.

Referenser

Kapitel 1

- 1-1 **Havel R, 2000.** FRINK projektrapport. Inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret. SKB R-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-2 **Havel R, 2000.** Jämförelse av alternativa lokaliseringar för inkapslingsanläggningen. SKB R-00-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 1-3 **SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I–IV. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

Kapitel 3

- 3-1 **SKB, 1999.** Djupförvar av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 3-2 **SKB, 2003.** Planning report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 3-3 **SKB, 2004.** Interim report of the safety assessment SR-Can. SKB TR-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 4

- 4-1 **Gillin K, 1998.** Säkerheten vid drift av inkapslingsanläggningen. SKB R-98-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 5

- 5-1 **SKB, 1998.** FUD-program 98. Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk djupförvaring. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-2 **SKB, 2002.** Övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet. SKB R-02-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-3 **Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-4 **King F, Ahonen L, Taxén C, Vuorinen U, Werme L, 2001.** Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-5 **Rosborg B, Werme L, 2003.** Influence of Surface Defects on Pitting Resistance of Copper Canisters. Presented at 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, August 10–14, 2003 Stevenson, WA, USA.
- 5-6 **King F, 2004.** The effect of discontinuities on the corrosion behaviour of copper canisters. SKB TR-04-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-7 **Bell K, 1995.** Tearing resistance and integrity assessment of electron beam welds in nuclear fuel canisters. SKB Projekt Inkapsling PPM 96-3420-13.
- 5-8 **Andersson C-G, 2001.** Utveckling av tillverkningsteknik för kopparkapslar med gjutna insatser. Lägesrapport i augusti 2001. SKB R-01-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-9 **Andersson C-G, Emilsson G, Eriksson P, Westman M, 2004.** Lägesrapport kapseltillverkning. SKB R-04-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-10 **Ronneteg U, Moberg B, 2003.** Inkapslingsteknik. Lägesrapport 2002. Oförstörande provning. SKB R-03-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 5-11 **Ssemakula H, 2004.** Manufacturing of heavy rings and large copper canisters by plastic deformation. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology.
- 5-12 **Lundin M, Gustafsson O, von Brömsen B, Troell E, 2001.** Granskning av SKB:s förslag till inkapslingsteknik. SKI Rapport 01:9, Statens kärnkraftinspektion.

Kapitel 6

- 6-1 **Müller C, Öberg T, 2004.** Strategy for verification and demonstration of the sealing processing for canisters for spent fuel. SKB R-04-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-2 **Andersson C-G, 1998.** Provtillverkning av kopparkapslar med gjutna insatser. Lägesrapport augusti 1998. SKB R-98-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-3 **Claesson S, Ronneteg U, 2003.** Electron beam welding of copper lids. Status report up to 2001-12-31. SKB R-03-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 6-4 **Claesson S, 2004.** Elektronstrålesvetsning av kopparlock rapport 2. Statusrapport till 2003-12-31. SKB R-04-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-5 **Andersson C-G, Andrews R E.** "Verktyg" International Patent Application No PCT/SE02/00908.
- 6-6 **Ronneteg U, Moberg B, 2003.** Inkapslingsteknik. Lägesrapport 2002. Oförstörande provning. SKB R-03-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-7 **Stepinski T, 2004.** Deep penetrating eddy current for nondestructive inspection of canister welds. SKB R-04-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 6-8 **US Department of Defense, 1999.** Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, Military Handbook, MIL-HDBK-1823, US Air Force Aeronautical Systems Center.

Kapitel 7

- 7-1 **Müller C, Öberg T, 2004.** Strategy for verification and demonstration of the sealing processing for canisters for spent fuel. SKB R-04-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 7-2 **Lemaitre P (ed), 1998.** ENIQ recommended practice 2: recommended contents for a technical justification, issue 1. ENIQ Report nr 4, EUR 18099 EN, European Commission.
- 7-3 **Lemaitre P (ed), 1999.** ENIQ recommended practice 4: recommended contents for the qualification dossier, issue 1. ENIQ Report nr 13, EUR 18685 EN, European Commission.

Kapitel 8

- 8-1 **Havel R, 2000.** Jämförelse av alternativa lokaliseringar för inkapslingsanläggningen. SKB R-00-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 8-2 **Gillin K, 1998.** Säkerheten vid drift av inkapslingsanläggningen. SKB R-98-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 8-3 **Havel R, 2000.** FRINK projektrapport. Inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret. SKB R-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 8-4 **IAEA, 2004.** Model protocol additional to the agreement(s) between state(s) and the International Atomic Energy Agency for the application of safeguards. International Atomic Energy Agency, INFCIRC/540, Wien.

Kapitel 9

- 9-1 **IAEA, 1996.** Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 1996 Edition (revised), TS-R-1. International Atomic Energy Agency.

Kapitel 10

- 10-1 **Autio J, 1996.** Boring of fullscale demonstration holes using a novel dry blind boring method. SKB TR-96-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-2 **Bodén A, m fl, 2001.** Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996–2000. SKB R-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-3 **Fransson Å, 2001.** Characterisation of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Doktorsavhandling, avd för Geologi, Chalmers.
- 10-4 **Eriksson M, 2002.** Prediction of grout spread and sealing effect – A probabilistic method. Doktorsavhandling, avd för Jord- och bergmekanik, KTH.
- 10-5 **Eriksson M, Fransson Å, Emmelin A, 2004.** Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level at Äspö HRL. SKB R-04-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-6 **Eklund D, 2003.** Penetrability for cementitious injection grouts. Licentiatrapport, avd för Jord- och bergmekanik, KTH.
- 10-7 **SKB 2004.** Deep repository. Underground design premises. Edition D1.1. SKB R-04-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-8 **EU, 2004.** The European Integrated Project ESDRED (Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs), part of the European Union (EU) 6th Euratom Framework Programme for Nuclear Research and Training (2002–2006).
- 10-9 **Johannesson L-E, Nord S, Pusch R, Sjöblom R, 2000.** Isostatic compaction of beaker shaped bentonite blocks on the scale 1:4. SKB TR-00-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-10 **Gunnarsson D, Börgesson L, Keto P, Tolppanen P, Hansen J, 2004.** Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. SKB R-04-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-11 **Gunnarsson D, Börgesson L, Hökmark H, Johannesson L-E, Sanden T, 2001.** Äspö Hard Rock Laboratory. Report on the installation of the Backfill and Plug Test. SKB IPR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-12 **Fairhurst C, Gera F, Gnirk P, Gray M, Stillborg B, 1993.** OECD/NEA International Stripa Project 1980–1992. Overview report, Volumes I–III. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 10-13 **Kalbantner P, 2004.** Friläggning av en kapsel i full skala. SKB R-XX-XX, Svensk Kärnbränslehantering AB, (i manus).
- 10-14 **SKB, 1992.** PASS – Projekt Alternativstudier för slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-15 **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.
- 10-16 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 10-17 **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.
- 10-18 **SKB, 2001.** Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering. SKB R-01-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 11

- 11-1 **SKB 2004.** Deep repository. Underground design premises. Edition D1.1. SKB R-04-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-2 **SKB, 2004.** Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-3 **SKB, 2003.** Plan 2003. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-4 **SKB, 2002.** Övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet. SKB R-02-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-5 **Posiva, 2003.** Definition of System Requirements for KBS-3H. Deposition of Spent Nuclear Fuel. Working Report 2002-58. Posiva Oy, Finland.
- 11-6 **SKB, 2001.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E. Rak ramp med två driftområden. SKB R-01-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-7 **SKB, 2002.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E. Spiralramp med ett driftområde. SKB R-02-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-8 **SKB, 2002.** Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E. Schaktalternativ med ett driftområde. SKB R-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 11-9 **Bäckblom G, Christiansson R, Hedin A, Norman F, Lagerstedt L, 2003.** Utredning rörande tillträdesvägar till djupförvarets deponeringsområden. Schakt eller ramp? SKB R-03-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 12

- 12-1 **Bäckblom G, Almén K-E, 2004.** Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel. SKB R-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-2 **EU, 2004.** Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste. Final report to the European Commission Contract FIKW-CT-2001-20130.
- 12-3 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-4 **SKB, 2001.** Program för platsundersökningar vid Forsmark. SKB R-01-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-5 **SKB, 2001.** Geovetenskapligt program för platsundersökning vid Simpevarp. SKB R-01-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 12-6 **Euratombfördraget IAEA, 1988.** Advisory group meeting on safeguards for final disposal of nuclear material in waste and spent fuel (AGM-660). STR-243 (Revised) IAEA, Vienna, December.
- 12-7 **IAEA, 1998.** SAGOR. Reference Volume for Safeguards for the Final Disposal of Spent Fuel in Geologic Repositories (SAGOR Activities). Report K/NSP-659.
- 12-8 **IAEA, 1997** (corrected), Model protocol additional to the agreement(s) between state(s) and the International Atomic Energy Agency for the application of safeguards. International Atomic Energy Agency, Infcirc/540/. (<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs>).
- 12-9 **IAEA, 2003.** Report on the experts meeting on interface issues and interaction between safeguards and radioactive waste management in the context of geological repositories. STR-38, IAEA, Vienna.

Kapitel 13

- 13-1 **SKB, 2004.** Interim main report of the safety assessment SR-Can. SKB TR-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-2 **SKB, 1999.** SR 97 Processer i förvarets utveckling. Underlagsrapport till SR 97. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 13-3 **SKB, 2003.** Planning report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, s 54–55.

Kapitel 14

- 14-1 **SKB, 2004.** Interim report of the safety assessment SR-Can. SKB TR-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-2 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport, Del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-3 **Posiva, 2003.** Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants: Programme for research, development and technical design for 2004–2006. TKS-2003, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- 14-4 **SKB, 2003.** Planning report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-5 **Hedin A, 2004.** Integrated near field evolution model for an SNF repository. SKB R-04-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-6 **Hedin A, 2002.** Integrated Analytic Radionuclide Transport Model for a Spent Nuclear Fuel Repository in Saturated Fractured Rock. Nuclear Technology 138(2002):2 179–205.
- 14-7 **Romero L, 1995.** The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste. Ph.D Thesis, TRITA-KET R21, The Royal Institute of Technology.
- 14-8 **Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use in the Proper package. SKB TR 90-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-9 **Romero L, Thompson A, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Boghammar A, 1999.** Comp23/ Nufran User's Guide. SKB R-99-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 14-10 **Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments. Modules for various biosphere types. SKB TR-99-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 15

- 15-1 **SKB, 2003.** Plan 2003. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-2 **SKB, 1999.** SR 97, Huvudrapport del I. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-3 **Olander D, 2004.** Thermal spike theory of athermal diffusion of fission products due to alpha decay of actinides in spent fuel (UO₂). SKB TR-04-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-4 **Håkansson R, 1999.** Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB R-99-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-5 **Agrenius L, 2002.** Criticality safety calculations of storage canisters. SKB TR-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-6 **Cui D, Low J, Lundström M, Spahiu K, 2004.** Spent fuel leaching under anoxic conditions and the effect of canister materials. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 89–94.
- 15-7 **Spahiu K, Eklund U-B, Cui D, Lundström M, 2002.** The influence of near field redox conditions on spent fuel leaching. In Scientific Basis for Nuclear waste management XXV, Materials Research Society Symposium Series, Vol 713 (B Peter McGrail and G Cragnolino eds), pp 633–638.
- 15-8 **Cui D, Spahiu K, 2002.** The reduction of U(VI) on corroded iron under anoxic groundwater conditions Radiochimica Acta, 90, pp 1–6.
- 15-9 **Spahiu K, Devoy J, Cui D, Lundström M, 2003.** The reduction of U(VI) by near field hydrogen in the presence of UO₂(s). Presented at Migration 2003 Conference, Radiochimica Acta (in press).
- 15-10 **Ollila K, Lindqvist K, 2003.** Air oxidation tests with Gd-doped UO₂. Preliminary dissolution experiments with pre-oxidized Gd-doped UO_{2+x}. Posiva Report 2003-08, Posiva OY.
- 15-11 **Ollila K, Albinsson Y, Oversby V, Cowper M, 2003.** Dissolution rates of unirradiated UO₂, UO₂ doped with ²³³U, and spent fuel under normal atmospheric conditions and under reducing conditions using an isotope dilution method. SKB TR-03-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-12 **SKB, 1999.** SR 97 Huvudrapport del II. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-13 **Sellin P, 2001.** SR 97: Hydromechanical evolution in a defective canister. In Scientific Basis for Nuclear waste management XXVI, Materials Research Society Symposium Series, Vol 663, (Hart K P and Lumpkin G R eds), pp 755–763.
- 15-14 **Spahiu K, Werme L, Eklund U-B, 2000.** The influence of near field hydrogen on actinide solubilities and spent fuel leaching. Radiochimica Acta, 88, pp 507–511.
- 15-15 **Guppy R M, Atkinson A, Valentine T M, 1989.** Studies of the solubility of technetium under a range of redox conditions. Harwell ARE-R 13467, DOE/RW/89/102.
- 15-16 **Cui D, Eriksen T, 1996.** Reduction of Tc(VII) and Np(V) in solution by ferrous iron. A laboratory study of homogeneous and heterogeneous redox processes. SKB TR-96-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-17 **Spahiu K, Cui D, Lundström M, 2003.** The fate of radiolytic oxidants during spent fuel leaching in the presence of dissolved near field hydrogen. Presented at Migration 2003 Conference, Radiochimica Acta (in press).

- 15-18 **Loida A, Grambow B, Geckeis H, 2001.** Spent Fuel corrosion behaviour in salt solution in the presence of hydrogen overpressure. Proceedings of the ICEM 01 Conference, Bruges, Belgium.
- 15-19 **Albinsson Y, Jensen A Ö, Oversby V, Werme L, 2003.** Leaching of spent fuel under anaerobic and reducing conditions. In Scientific Basis for Nuclear waste management XXVI, Materials Research Society Symposium Series, Vol 757, (Finch R J and Bullen DB eds), pp 407–413.
- 15-20 **Poinssot C (ed), 2003.** Spent fuel stability under repository conditions. EU-Project SFS, 2nd Annual Report.
- 15-21 **Bruno J, Cera E, Eriksen T E, Grivé M, Ripoll S, 2004.** Modelling experimental results on radiolytic processes at the spent fuel water interface. I. Radiolysis products and U release. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 397–402.
- 15-22 **Pastina B, Isabey J, Hickel B, 1999.** The influence of water chemistry on the radiolysis of primary coolant water in pressurized water reactors. Journal of Nuclear Materials, 264, pp 309–318.
- 15-23 **Pastina B, LaVerne J A, 2001.** Effect of molecular hydrogen on hydrogen peroxide in water radiolysis. Journal of Physical Chemistry A, 105, pp 9316–9322.
- 15-24 **Eriksen T, 1996.** Radiolysis of water within a ruptured fuel element. SKB PR U-96-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-25 **Christensen H, 1998.** Calculations simulating spent fuel leaching experiments. Nuclear Technology 124, pp 165–174.
- 15-26 **Jonsson M, Nielsen F, Ekeröth E, Eriksen T, 2004.** Modeling of the effects of radiolysis on UO₂-dissolution employing recent experimental data. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 385–390.
- 15-27 **Liu L, Neretniks I, 2002.** The effect of hydrogen on the oxidative dissolution of spent fuel. Nuclear Technology, 138, pp 69–77.
- 15-28 **King F, Quinn M J, Miller N H, 1999.** The effect of hydrogen and gamma radiation on the oxidation of UO₂ in 0.1 mol·dm⁻³ NaCl solution. SKB TR-99-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-29 **Sunder S, Boyer G D, Miller N H, 1990.** XPS studies of UO₂ oxidation by alpha radiolysis of water at 100 °C. Journal of Nuclear Materials, 175, pp 163–169.
- 15-30 **LaVerne J A, Tandon L, 2003.** H₂ production in the radiolysis of water on UO₂ and other oxides. Journal of Physical Chemistry B, 107, pp 13623–13628.
- 15-31 **Cui D, Spahiu K, 2001.** On the interaction between uranyl carbonate and UO₂(s) in anaerobic aqueous solution. Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 3, pp 500–503.
- 15-32 **Imizu Y, Tanabe K, Hattori H, 1979.** Selective formation of trans-butene and methyl-butene in deuteration of butadiene derivatives over thorium oxide catalyst. Journal of Catalysis, 56, pp 303–314.
- 15-33 **Haschke J M, Allen T H, Stakebake J L, 1996.** Reaction kinetics of plutonium with oxygen, water and humid air. Journal of Alloys and Compounds, 243, pp 23–35.
- 15-34 **Devoy J, Haschke J, Cui D, Spahiu K, 2004.** Behaviour of uranium dioxide: Chemistry and catalysis in the UO₂-water system. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 41–46.
- 15-35 **Cui D, Low J, Sjöstedt C J, Spahiu K, 2003.** On Mo-Ru-Tc-Pd-Rh alloy particles extracted from spent fuel and their leaching behavior under repository conditions. Presented at Migration 2003 Conference, Radiochimica Acta (in press).
- 15-36 **Forsyth R S, 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.
- 15-37 **Cui D, Devoy J, Spahiu K, 2003.** The surface precipitation during the UO₂ leaching process. In Scientific Basis for Nuclear waste management XXVI, Materials Research Society Symposium Series, Vol 757, (Finch R J and Bullen D B eds), pp 359–364.
- 15-38 **Werme L O, Spahiu K, 1998.** Direct disposal of spent nuclear fuel: comparison between experimental and modelled actinide solubilities in natural waters. Journal of Alloys and Compounds. 271–273, pp 194–200.
- 15-39 **Röllin S, Spahiu K, Eklund U-B, 2001.** Determination of dissolution rates of spent fuel in carbonate solutions under different redox conditions with a flow-through experiment. Journal of Nuclear Materials, 297, pp 231–243.
- 15-40 **Cui D, Spahiu K, Wersin P, 2003.** Redox reactions of iron and uranium in simulated cement pore water under anoxic conditions. In Scientific Basis for Nuclear waste management XXVI, Materials Research Society Symposium Series, Vol 757 (Finch R J and Bullen D B eds), pp 427–432.
- 15-41 **Bruno J, Cera E, Grive M, Duro L, Eriksen T, 2003.** Experimental determination and chemical modelling of the radiolytic processes at the spent fuel water interface. Experiments carried out in carbonate solutions in absence and presence of chloride. SKB TR-03-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 15-42 **Ekeroth E, Jonsson M, 2003.** Oxidation of UO_2 by radiolytic oxidants. *Journal of Nuclear Materials*, 322, pp 242–248.
- 15-43 **Jonsson M, Ekeroth E, Roth O, 2004.** Dissolution of UO_2 by one and two electron oxidants. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings* (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 77–82.
- 15-44 **Christensen H, 2003.** Oxidation of UO_2 fuel by water radiolysis products. The effect of secondary phases. Studsvik Report / N(K)-03/027, Studsvik Nuclear AB.
- 15-45 **Christensen H, Lundström T, 2004.** Oxidation of UO_2 fuel by water radiolysis products. Oxidation in 5 M NaCl solutions. Studsvik Report / N-04/014, Studsvik Nuclear AB.
- 15-46 **Rai D, Gorby Y A, Fredrickson J K, Moore, D. A, Yui M, 2002.** Reductive dissolution of $\text{PuO}_2(\text{am})$: The effect of Fe(II) and hydrohydroquinone. *Journal of Solution Chemistry*, 31, p 433.
- 15-47 **Nilsson H, Albinsson Y, Skarnemark G, 2004.** Dissolution of plutonium(III) at 50 bar H_2 . In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings* (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 615–620.
- 15-48 **Ödegaard-Jensen A, Albinsson Y, Nilsson H, 2004.** Solubility of Pu carbonates under reducing conditions. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings* (V M Oversby and L O Werme eds), Vol 807, pp 585–588.
- 15-49 **Wahlgren U, 2003.** Investigating the thermodynamics of the reduction of U(VI) to U(V) by Fe(II) using ab initio methods. SKB TR-03-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-50 **Butorin S, Ollila K, Albinsson Y, Nordgren J, Werme L, 2003.** Reduction of uranyl carbonate and hydroxyl complexes and neptunyl carbonate complexes studied with chemical-electrochemical methods and rixs spectroscopy. SKB TR-03-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-51 **Rovira M, de Pablo J, El Aamrani S, Duro L, Grivé M, Bruno J, 2003.** Study of the role of magnetite in the immobilisation of U(VI) by reduction to U(IV) under the presence of $\text{H}_2(\text{g})$ in hydrogen carbonate medium. SKB TR-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 15-52 **Scheidegger A M, Grolimund D, Cui D, Devoy J, Spahiu K, Wersin P, Bonhouse I, Janousch M, 2003.** Reduction of selenite on iron: a micro-spectroscopic study. *Journal de Physique*, 4.
- 15-53 **Spahiu K, 2002.** Phase II of the NEA TDB project and some lessons learned from the use of Phase I data in PA. In *The use of thermodynamic databases in performance assessment, Workshop Proceedings*, May 29–30 Barcelona Spain, pp 31–39. OECD-NEA.
- 15-54 **Spahiu K, 2002.** The use of SIT in the NEA TDB project – Advantages, drawbacks and comparison with the approaches used in some geochemical codes. In *The use of thermodynamic databases in performance assessment. Workshop Proceedings*, May 29–30 Barcelona Spain, pp 61–69. OECD-NEA.

Kapitel 16

- 16-1 **Ronneteg U, Moberg B, 2003.** Inkapslingsteknik. Lägesrapport 2002. Oförstörande provning. SKB R-03-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-2 **Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2004.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. SKB TR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-3 **Andersson H, Seitisleam F, 2004.** Creep testing of thick-walled copper electron beam welds and friction stir welds. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 824, (in press).
- 16-4 **Smart N R, Bond A E, Crossley J A A, Lovegrove P C, Werme L, 2001.** Mechanical properties of oxides formed by anaerobic corrosion of steel. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 663, pp 477–495.
- 16-5 **Smart N R, Rance A P, Fennel P, Werme L, 2003.** Expansion due to anaerobic corrosion of steel and cast iron: experimental and natural analogue studies. *European Federation of Corrosion Publications* No 36, pp 280–294.
- 16-6 **Smart N R, Adams R, Werme L, 2004.** Analogues for the corrosion-induced expansion of ferrous materials in HLW containers. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 807, pp 879–884.
- 16-7 **Smart N R, Blackwood D J, Werme L, 2002a.** Anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters: Part 1 – Electrochemical aspects. *Corrosion* 58:7, pp 547–559.
- 16-8 **Smart N R, Blackwood, D J, Werme L, 2002b.** Anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters: Part 2 – Gas generation. *Corrosion* 58:8, pp 627–637.
- 16-9 **Smart N R, Rance A P, Werme L, 2004.** Anaerobic corrosion of steel in bentonite. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 807, pp 441–446.
- 16-10 **Smart N R, Rance A P, Fennel P A H, 2004.** Galvanic corrosion of copper-cast iron couples. SKB TR-XX-XX, Svensk Kärnbränslehantering AB, (i manus).
- 16-11 **Guinan M W, 2001.** Radiation effects in spent nuclear fuel canisters. SKB TR-01-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 16-12 **King F, 2002.** Corrosion of copper in alkaline chloride environments. SKB TR-02-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-13 **Fennel P A H, Graham A J, Smart N R, Sofield C J, 2001.** Grain boundary corrosion of copper canister material. SKB TR-01-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 16-14 **Bojinov M, Mäkelä K, 2003.** Corrosion of copper in anoxic 1M NaCl solution. Posiva Working Report 2003-45, Posiva Oy, Finland.
- 16-15 **Betova I, Bojinov M, Laitinen T, Mäkelä K, Snellman M, Werme L, 2004.** Corrosion of copper in 1 m NaCl under strictly anoxic conditions. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 429–434.
- 16-16 **Masurat P, Pedersen K, 2004.** Microbial sulphide formation in compacted bentonite at the commencement of long-term disposal of high-level radioactive waste. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 805–810.
- 16-17 **Taxén C, 2004.** Atmospheric corrosion of copper 450 metres underground. Results from three years exposure in the Äspö HRL. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 423–428.

Kapitel 17

- 17-1 **SKB, 1999.** SR 97, Huvudrapport del I. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-2 **Meier L P, Kahr G, 1999.** Clays and Clay Minerals, 47(3), pp 386–388.
- 17-3 **Müller-Vonmoos M, Kahr G, 1983.** Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. NAGRA Technischer Bericht NTB 83-12, Wettingen, Schweiz.
- 17-4 **Newman A C D, 1987.** Chemistry of Clays and Clay Minerals. Monograph No 6. Mineralogical Society, London. ISBN 0-582-30114-9.
- 17-5 **Hökmark H, Fälth B, 2003.** Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature. SKB TR-03-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-6 **Ageskog L, Jansson P, 1999.** Heat propagation in and around the deep repository. Thermal calculations applied to three hypothetical sites: Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-7 **Claesson J, Probert T, 1996.** Temperature field due to time-dependent heat sources in a large rectangular grid. Derivation of analytical solution. SKB TR-96-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-8 **Börgesson L, Fredrikson A, Johannesson L-E, 1994.** Heat conductivity of buffer materials. SKB TR-94-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-9 **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.
- 17-10 **Johannesson L-E, Börgesson L, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Laboratory tests on Friedland Clay. Friedland Clay as backfill material. Results of laboratory tests and swelling/compression calculations. SKB IPR-02-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-11 **Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2004.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. SKB TR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-12 **Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2004.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and buffer. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 521–526.
- 17-13 **Hökmark H, 2004.** Hydration of the bentonite buffer in a KBS-3 repository. International meeting on clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement in Reims 2002. Applied Clay Science, (in press).
- 17-14 **Hökmark H, 2003.** Temperature buffer test – Comparison of modelling results/experimental findings: Causes of differences. Sitges workshop on large scale field tests in granite, November 12–14, 2003, University of Catalonia, Spain.
- 17-15 **Goudarzi R, Börgesson L, Sandén T, Barcena I, 2004.** Äspö Hard Rock Laboratory. Temperature buffer test. Sensors data report. Report No:1. SKB IPR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-16 **Karland O, Muurinen A, Karlsson F, 2003.** Bentonite swelling pressure in NaCl solutions – Experimentally determined data and model calculations. Sitges workshop on large scale field tests in granite. November 12–14, 2003. University of Catalonia, Spain.
- 17-17 **Karland O, Sellin P, Olsson S, 2004.** Mineralogy and some Physical properties of San José bentonite – A natural analogue to buffer material exposed to saline groundwater. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 849–854.
- 17-18 **Domènech C, Arcos D, Bruno J, Karland O, 2004.** Geochemical model of the granite-bentonite-groundwater at Äspö (Lot-experiment). In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 855–860.

- 17-19 **Le Bell J C, 1978.** Colloid chemical aspects of the “confined bentonite concept”. KBS TR 97, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-20 **Karnland O, Sandén T, Johannesson L-E, Eriksen T E, Jansson M, Wold S, Pedersen K, Motamedi M, Rosborg B, 2000.** Long term test of buffer material. Final Report on the pilot parcels. SKB TR-00-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 17-21 **Molera M, Eriksen T, Jansson M, 2003.** Anion diffusion pathways in bentonite clay compacted to different dry densities. Applied Clay Science 23, pp 69–76.
- 17-22 **Jansson M, Eriksen T, 1998.** CHEMLAB – In situ diffusion experiments using radioactive tracers. Radiochimica Acta, 82, pp 153–156.
- 17-23 **Jansson M, Eriksen T, 2004.** In situ anion diffusion experiments using radiotracers. Journal of Contaminant Hydrology 68, pp 183–192.
- 17-24 **Jansson M, Eriksen T, Wold S, 2003.** LOT – in situ diffusion experiments using radioactive tracers, Applied Clay Science, 23, pp 77–85.
- 17-25 **Neretnieks I, 1979.** Transport mechanisms and rates of transport of radionuclides in the geosphere as related to the Swedish KBS concept. Proceedings, International Atomic Energy Agency IAEA-SM-243/108, July 2–6, pp 315–339.
- 17-26 **Neretnieks I, 1982.** Leach rates of high level waste and spent fuel – Limiting rates as determined by backfill and bedrock conditions. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management V, Materials Research Society Symposium. Proceedings Vol 11, NorthHolland, New York, pp 559–568.
- 17-27 **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.
- 17-28 **Wold S, 2003.** On diffusion of organic colloids in compacted bentonite. Doctoral Thesis, Department of Nuclear Chemistry, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Kapitel 18

- 18-1 **Gunnarsson D, Börgesson L, Keto P, Tolppanen P, Hansen J, 2004.** Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. SKB R-04-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-2 **Gunnarsson D, Börgesson L, Hökmark H, Johannesson L-E, Sandén T, 2001.** Äspö Hard Rock Laboratory. Report on the installation of the Backfill and Plug Test. SKB IPR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-3 **Börgesson L, Johannesson L-E, Gunnarsson D, 2003.** Influence of soil structure heterogeneities on the behaviour of backfill materials based on bentonite and crushed rock. Journal of Applied Clay Science 23.
- 18-4 **Gunnarsson D, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Backfill production for Prototype Repository. SKB IPR-02-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-5 **Johannesson L-E, Börgesson L, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Laboratory tests on Friedland clay. SKB IPR-02-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-6 **Pusch R, Gunnarsson D, 2001.** Field compaction tests on Friedland clay at Äspö Hard Rock Laboratory. SKB IPR-01-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-7 **Martin C D, Christiansson R, Söderhäll J, 2001.** Rock stability considerations for siting and construction a KBS-3 repository. Based on experiences from Äspö HRL, AECL’s URL, tunnelling and mining. SKB TR-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-8 **Martin D, Cho N, 2001.** Bidrag till Workshop on Rock-Backfill interaction. Äspö Hard Rock Laboratory.
- 18-9 **Glamheden R, Hökmark H, Christiansson R, 2001.** Preliminary Results from 3DEC Modelling of a Deposition Tunnel in a KBS-3 type Repository. Proceedings from Workshop on Backfill Requirements for a KBS-3 type Repository. Äspö Hard Rock Laboratory.
- 18-10 **Larsson H, Kenne A, Edelsvärd Ch, 1997.** Främmande material i djupförvaret. Tillförsel och fördelning i deponeringsområdena för kapslar. SKB PR D-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 18-11 **Jones C, Christiansson Å, Wiborgh M, 1999.** Främmande material i ett djupförvar för använt kärnbränsle. SKB R-99-72, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 19

- 19-1 **Hökmark H, Fälth B, 2003.** Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature. SKB TR-03-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-2 **Sundberg J, 2002.** Determination of thermal properties at Äspö HRL. Comparison and evaluation of methods and methodologies for borehole KA2599 G01. SKB R-02-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-3 **Sundberg J, Kukkonen I, Hälldahl L, 2003.** Comparison of thermal properties measured by different methods. SKB R-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 19-4 **Sundberg J, 2003.** Thermal site descriptive model. A strategy for the model development during site investigations. Version 1.0. SKB R-03-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-5 **Sundberg J, 2003.** Thermal properties at Äspö HRL. Analysis of distribution and scale factors. SKB R-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-6 **Marsic N, Hartley L, Jackson, P, Poole M, Morvik A, 2001.** Development of hydrogeological modelling tools based on NAMMU. SKB R-01-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-7 **Marsic N, Hartley L, Sanchez-Friera P, Morvik, A, 2002.** Embedded regional/Local-scale model of natural transients in saline groundwater flow. Illustrated using the Beberg site. SKB R-02-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-8 **Gylling B, Marsic N, Hartley L, Holton, D, 2004.** Applications of hydrogeological modelling methodology using NAMMU and CONNECTFLOW – Task 1, 2, 3 and 4. SKB R-04-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-9 **Svensson U, 2004.** DarcyTools V2.1 Verification and validation. SKB R-04-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-10 **Svensson U, Ferry M, 2004.** DarcyTools V2.1 User's Guide. SKB R-04-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-11 **Svensson U, Kuylenstierna H-O, Ferry M, 2004.** DarcyTools V2.1 Concepts, methods, equations and demo simulations. SKB R-04-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-12 **Jaquet O, Siegel P, 2004.** Local-scale modelling of density-driven flow for the phases of repository operation and post-closure at Beberg. SKB R-04-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-13 **SKB, 2004.** Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-14 **SKB, 2004.** Preliminary site description Oskarhamn area – version 1.1. SKB R-04-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-15 **Jaquet O, Siegel P, 2003.** Groundwater flow and transport modelling during a glaciation period. SKB R-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-16 **Holmén J, Stigsson M, Marsic N, Gylling B, 2003.** Modelling of groundwater flow and flow paths for a large regional domain in northeast Uppland. A three-dimensional, mathematical modelling of groundwater flows and flow paths on a super-regional scale, for different complexity levels of the flow domain. SKB R-03-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-17 **Follin S, Svensson U, 2003.** On the role of mesh discretisation and salinity for the occurrence of local flow cells. Results from a regional-scale groundwater flow model of Östra Götaland. SKB R-03-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-18 **Holmén J, Forsman J, 2004.** Flow of groundwater from great depths in the near surface deposits; modelling of a local domain in northeast Uppland. SKB R-04-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-19 **Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-20 **Gylling B, 1997.** Development and applications of the Channel Network Model for simulations of flow and solute transport in fractured rock, PhD thesis, KTH, Stockholm, ISBN 91-7170-190-7.
- 19-21 **Moreno L, Crawford J, Neretnieks I, 2004.** Modelling of solute transport under flow conditions varying in time, using the channel network model. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 797–802.
- 19-22 **Åhlén B, 2004.** Flerfasflöde i geosfären kring ett förvar för utbränt kärnbränsle. SKB R-04-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-23 **Andersson J, Christiansson R, Hudson J, 2002.** Site investigations. Strategy for rock mechanics site descriptive model. SKB TR-02-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-24 **Ljunggren C, Chang Y, Jansson T, Christiansson R, 2003.** An overview of rock stress measurement methods. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 7–8, special issue on rock stress estimation.
- 19-25 **Hudson J A, Cornet F H, Christiansson R, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 7–8, special issue on rock stress estimation.
- 19-26 **Sjöberg J, Christiansson R, Hudson J A, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 7–8, special issue on rock stress estimation.
- 19-27 **Haimson B C, Cornet F H, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 7–8, special issue on rock stress estimation.
- 19-28 **Christiansson R, Hudson J A, 2003.** ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 4: Quality control of rock stress estimation. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 40, Nos 7–8, special issue on rock stress estimation.

- 19-29 **Hudson J (ed), 2002.** Strategy for a rock mechanics site descriptive model. A test case based on data from the Äspö HRL. SKB R-02-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-30 **Andersson J, Berglund J, Follin S, Hakami E, Halvarsson J, Hermanson J, Laaksoharju M, Rhen I, Wahlgren C-H, 2002.** Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-31 **SKB, 2002.** Forsmark – site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-32 **SKB, 2002.** Simpevarp – site descriptive model version 0. SKB R-02-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-33 **Martin D, Christiansson R, Söderhäll J, 2001.** Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository. Based on Experiences from Äspö HRL, AECL's URL, tunneling and mining. SKB TR-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-34 **Andersson C, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar stability experiment. Feasibility study. SKB IPR-03-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-35 **Staub I, Andersson J C, Magnor B, 2004.** Äspö Pillar Stability Experiment. Geology and mechanical properties of the rock mass in TASQ. SKB R-04-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-36 **Hakami E, Olofsson S-O, 2002.** Numerical modelling of fracture displacements due to thermal load from a KBS-3 repository. SKB TR-02-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-37 **Hökmark H, 2003.** Canister positioning. Influence of fracture system on deposition hole stability. SKB R-03-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-38 **Chryssantakis O, Tunbridge L, Christiansson R, 2003.** Numerical modeling in 3D of the TBM/ZEDEX tunnels at Äspö Hard Rock Laboratory and comparison with in-situ stress measurements. Proceedings of the Underground Construction Conference in London.
- 19-39 **Staub I, Fredriksson A, Outters N, 2002.** Strategy for a rock mechanics site descriptive model. Development and testing of the theoretical approach. SKB R-02-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-40 **Röshoff K, Lanaro F, Jing L, 2002.** Strategy for a rock mechanics site descriptive model. Development and testing of the empirical approach. SKB R-02-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-41 **Hökmark H, Christiansson M, Baker C, Munier R, 2004.** Respect distances: Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-42 **Bäckblom G, Munier R, 2002.** Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB TR-02-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-43 **Boulton G, Christiansson R, Ericsson L O, Hartikainen J, Jensen M R, Stabchell F W, Wallroth T, 2003.** Thermo-Hydro-Mechanical (T-H-M) impact of glaciation and implications for deep geological disposal of nuclear waste. In GeoProc 2003. International conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Application. Dept. of land and water resources engineering, Royal Institute of Technology.
- 19-44 **SKB, 2003.** Planning report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-45 **Staub I, Jansson T, Fredriksson A, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar experiment. Geology and properties of the rock mass around the experiment volume. SKB IPR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-46 **Wanne T, Johansen E, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar stability experiment. Coupled 3D thermo-mechanical modelling. Preliminary results. SKB IPR-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-47 **Fredriksson A, Staub I, Jansson T, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar stability experiment. Design of heaters and preliminary results from coupled 2D thermo-mechanical modeling. SKB IPR-03-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-48 **Rinne M, Shen B, Lee H-S, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö pillar stability experiment. Modelling of fracture stability by Fracod. Preliminary results. SKB IPR-03-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-49 **LaPointe P, Cladouhos T, Outters N, Follin S, 2000.** Evaluation of the conservativeness of the methodology for estimating earthquake-induced movements of fractures intersecting canisters. SKB TR-00-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-50 **Glamheden R, Hökmark H, Christiansson R, 2001.** Preliminary Results from 3DEC Modelling of a Deposition Tunnel in a KBS-3 type Repository. Proc. Workshop on Backfill Requirements for a KBS-3 type Repository. Äspö HRL, Sweden.
- 19-51 **Swantesson J O H, 1992.** Recent micro-weathering phenomena in southern and central Sweden. Permafrost/Periglacial Processes 3, pp 275–292.
- 19-52 **Pässe T, 2004.** The amount of glacial erosion. SKB R-XX-XX, Svensk Kärnbränslehantering AB, (i manus).
- 19-53 **SKB, 1999.** SR 97 – Processes in the repository evolution. SKB TR-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 19-54 **Dershowitz B, Shuttle D, Klise K, Outters N, Hermanson J, 2004.** Transverse dispersion in heterogeneous fractures. SKB R-04-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-55 **Outters N, 2003.** A generic study of discrete fracture network transport properties using FracMan/MAFIC. SKB R-03-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-56 **Dershowitz B, Eiben T, Follin S, Andersson J, 1999.** SR 97 – Alternative models project. Discrete fracture network modelling for performance assessment of Aberg. SKB R-99-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-57 **Outters N, Shuttle D, 2000.** Sensitivity analysis of a discrete fracture network model for performance assessment of Aberg. SKB R-00-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-58 **Painter S, Cvetkovic V, Selroos J-O, 2002.** Power-law velocity distributions in fracture networks: Numerical evidence and implications for tracer transport, *Geophysical Research Letters*, Vol 29, No 14, pp 21-1 to 21-4.
- 19-59 **Cvetkovic V, Painter S, Outters N, Selroos J-O, 2004.** Stochastic simulation of radionuclide migration in discretely fractured rock near the Äspö Hard Rock Laboratory, *Water Resour. Res.*, Vol 40, No 2.
- 19-60 **Painter S, Cvetkovic V, Selroos J-O, 2004.** Upscaling discrete fracture network simulations of solute transport, Second International Symposium on Dynamics of fluids in fractured rock, Berkeley, California, 10–12 February 2004, (<http://esd.lbl.gov/fluidsinrock/geninfo.html>).
- 19-61 **Starinsky A, Katz A, 2003.** The formation of natural cryogenic brines, *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, pp 1475–1484.
- 19-62 **RETROCK, 2004.** RETROCK Project: Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments. Scientific basis of retention concepts and their applicability for safety assessment modelling (WP2). SKB R-04-48, Svensk Kärnbränslehantering AB .
- 19-63 **Winberg A, Andersson P, Hermanson J, Byegård J, Cvetkovic V, Birgersson L, 2000.** Äspö Hard Rock Laboratory. Final report of the first stage of the Tracer Retention Understanding Experiments. SKB TR-00-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-64 **Andersson P, Byegård J, Dershowitz B, Doe T, Hermanson J, Meier P, Tullborg E-L, Winberg A, 2002.** Final report of the TRUE Block Scale projekt 1. Characterisation and model development. SKB TR-02-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-65 **Andersson P, Byegård J, Winberg A, 2002.** Final report of the TRUE Block Scale projekt 2. Tracer tests in the block scale. SKB TR-02-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-66 **Poteri A, Billaux D, Dershowitz W, Gómez-Hernández J J, Cvetkovic V, Hautojärvi A, Holton D, Medina A, Winberg A, 2002.** Final report of the TRUE Block Scale projekt. 3. Modelling of flow and transport. SKB TR-02-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-67 **Winberg A, Andersson P, Byegård J, Poteri A, Cvetkovic V, Dershowitz W, Doe T, Hermanson J, Gómez-Hernández J J, Hautojärvi A, Billaux D, Tullborg E-L, Holton D, Meier P, Medina A, 2002.** Final report of the TRUE Block Scale projekt. 4. Synthesis of flow, transport and retention in the block scale. SKB TR-02-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-68 **Kelokaski M, Oila E, Siitari-Kauppi M, 2001.** Äspö Hard Rock Laboratory. Investigation of porosity and micro-facturing of granitic fracture wall rock and fault breccia specimens using the PMMA technique. SKB IPR-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-69 **Cvetkovic V, 2003.** Äspö Hard Rock Laboratory. TRUE Block Scale continuation project. Significance of diffusion limitations and rim zone heterogeneity for tracer transport through fractures at the Äspö site. SKB IPR-03-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-70 **Byegård J, Johansson H, Andersson P, Hansson K, Winberg A, 1999.** Äspö Hard Rock Laboratory. Test Plan for the Long-Term Diffusion Experiment. SKB IPR-99-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-71 **Löfgren M, Neretnieks I, 2002.** Formation factor logging in-situ by electrical methods. Background and methodology. SKB TR-02-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-72 **Löfgren M, Neretnieks I, 2004.** A conceivable technique of measuring sorption coefficients in intact rock using an electrical potential gradient as the driving force for migration. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol 807, pp 683–688.
- 19-73 **Widestrand H, Byegård J, Ohlsson Y, Tullborg E-L, 2003.** Strategy for the use of laboratory methods in the site investigations programme for the transport properties of the rock. SKB R-03-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-74 **Smellie J A T, Waber H N, Frapé S K, 2003.** Matrix fluid chemistry experiment. Final report. June 1998–March 2003. SKB TR-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-75 **Gascoyne M, 1999.** Long-term maintenance of reducing conditions in a spent nuclear fuel repository. A re-examination of critical factors. SKB R-99-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-76 **Laaksohaju M, 1999.** Groundwater characterisation and modelling: problems, facts and possibilities. SKB TR-99-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 19-77 **Bath A, Milodowski A, Ruotsalainen P, Tullborg E-L, Cortés Ruiz A, Aranyossy J-F, 2000.** Evidence from mineralogy and geochemistry for the evolution of groundwater systems during the quaternary for use in radioactive waste repository safety assessment (EQUIP project). EUR 19613 EN, European Commission.
- 19-78 **Landström O, Tullborg E-L, Eriksson G, Sandell Y, 2001.** Effects of glacial/post-glacial weathering compared with hydrothermal alteration – implications for matrix diffusion. Results from drillcore studies in porphyritic quartz monzodiorite from Äspö SE Sweden. SKB R-01-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-79 **Puigdomenech I, Ambrosi J-P, Eisenlogh L, Lartigue J-E, Banwart S A, Bateman K, Milodowski A E, West J M, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Yoshida H, Kotelnikova S, Pedersen K, Michaud V, Trotignon L, Rivas Perez J, Tullborg E-L, 2001.** O₂ depletion in granitic media. The REX project. SKB TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-80 **Gustafsson Å B, Puigdomenech I, 2003.** The effect of pH on chlorite dissolution rates at 25 °C. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 757 (eds R J Finch and D B Bullen), Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 649–655.
- 19-81 **Tullborg E-L, 2004.** Palaeohydrogeological evidences from fracture filling minerals – Results from the Äspö/Laxemar area. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (eds V M Oversby and L O Werme), Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 873–878.
- 19-82 **Tullborg E-L, Smellie J A T, MacKenzie A B, 2004.** The use of natural uranium decay series studies in support of understanding redox conditions at potential radioactive waste disposal sites. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings (eds V M Oversby and L O Werme), Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 571–582.
- 19-83 **Kienzler B, Vejmelka P, Römer J, Fanghänel E, Jansson M, Eriksen T E, Wikberg P, 2003.** Swedish-German actinide migration experiment at Äspö Hard Rock Laboratory, J. Cont. Hydr. 61, pp 219–233.
- 19-84 **Löfgren M, Neretnieks I, 2002.** Formation factor measurements in granite in the laboratory – Comparison of through diffusion and electromigration techniques, MRS 2002 Fall Meeting, Boston, USA.
- 19-85 **Löfgren M, Neretnieks I, 2003.** Formation factor logging by electrical methods. Comparison of formation factor logs obtained in-situ and in the laboratory, Journal Contaminant Hydrology, vol 61, pp 107–115.
- 19-86 **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 M J and Livens F R, eds) Elsevier, Amsterdam, pp 279–311.
- 19-87 **Kotelnikova S, Pedersen K, 1999.** The Microbe-REX project. Microbial O₂ consumption in the Äspö tunnel. SKB TR-99-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-88 **Pedersen K, 2000.** Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-89 **Anderson C R, Pedersen K, 2003.** In situ growth of *Gallionella* biofilms and partitioning of lanthanids and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. Geobiology 1, pp 169–178.
- 19-90 **Kalinowski B E, Oskarsson A, Albinsson Y, Arlinger J, Ödegaard-Jensen A, Andlid T, Pedersen K, 2004.** Microbial leaching of uranium and other trace elements from shale mine tailings at Ranstad. Geoderma, in press.
- 19-91 **Ekendahl S, O'Neill A H, Thomsson E, Pedersen K, 2003.** Characterisation of yeasts isolated from deep igneous rock aquifers of the Fennoscandian Shield. Microbial Ecology 46, pp 416–428.
- 19-92 **Sidborn M, Neretnieks I, 2003.** Modelling of biochemical processes in rocks: oxygen depletion by pyrite oxidation – Model development and exploratory simulations. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 757 (eds R J Finch and D B Bullen), Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 553–558.
- 19-93 **Cvetkovic V, 2003.** Potential impact of colloids on plutonium migration at the Äspö site. SKB R-03-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-94 **Cvetkovic V, 2004.** Colloid-facilitated radionuclide transport in single fractures: Sensitivities and scoping calculations for tracer tests at Äspö. SKB R-04-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-95 **Vahlund F, Hermansson H, 2004.** FVFARF – a direct numerical approach to solving the transport equations for radionuclide transport in fractured rock. SKB R-04-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-96 **Klos R A, White M J, Wickham S M, Bennett D G, Hicks T W, 2002.** Quantitative Assessment of the Potential Significance of Colloids to the KBS-3 Disposal Concept, SKI Rapport 02:34, Statens kärnkraftinspektion.
- 19-97 **Haveman S H, Pedersen K, Ruotsalainen P, 1999.** Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. Geomicrobiology Journal 16, pp 277–294.

- 19-98 **Puigdomenech I, 2001.** Hydrochemical stability of groundwaters surrounding a spent nuclear fuel repository in a 100,000 year perspective. SKB TR-01-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-99 **Marschall P, Elert M, 2003.** Overall evaluation of the modelling of the TRUE-1 tracer tests – Task 4. The Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. SKB TR-03-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-100 **Dershowitz B, Winberg A, Hermanson J, Byegård J, Tullborg E-L, Andersson P, Mazurek M, 2003.** Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Task 6C. A Semi-synthetic model of block scale conductive structures at the Äspö HRL. SKB IPR-03-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-101 **Berglund S, Selroos J-O, 2003.** Transport Properties Site Descriptive Model – Guidelines for Evaluation and Modelling. SKB R-03-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-102 **Elert M, Gylling B, Lindgren M, 2004.** Assessment model validity document – FARF31. SKB R-04-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-103 **Cvetkovic V, Painter S, Selroos J-O, 2002.** Comparative measures of radionuclide containment in the crystalline geosphere, Nuclear Science and Engineering, 142, pp 292–304.
- 19-104 **Byegård J, Widestrand H, Skålborg M, Tullborg E-L, Siitari-Kauppi M, 2001.** First TRUE stage. Complementary investigation of diffusivity, porosity and sorptivity of Feature A-site specific geologic material. SKB ICR-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 19-105 **Cho N, Martin C D, Seago D C, Christansson R, 2004.** Modelling dilation in brittle rock. Proceedings of GulfRock 1004, ARMA/NARMS 04-483.

Kapitel 20

- 20-1 **SKB, 2003.** Planning report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-2 **Löfgren A, Lindborg T, 2003.** A descriptive ecosystem model – a strategy for model development during site investigations. SKB R-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-3 **SSI, 1998.** Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljö vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSI FS 1998:1, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-4 **SKB, 1999.** SR 97 – Processes in the repository evolution. SKB TR-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-5 **Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsunderökningar för ett djupförvar. SKB R-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-6 **Karlsson S, Meili M, Bergström U, 2002.** Bioaccumulation factors in aquatic ecosystems. A critical review. SKB R-02-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-7 **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.
- 20-8 **Edlund O, Bergström U, Hallberg B, Karlsson S, 1999.** A summary of biospheric research 1975–1997. SKB TR-99-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-9 **Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments. Modules for various biosphere types. SKB TR-99-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-10 **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.
- 20-11 **Karlsson S, Bergström U, Rosén K, 2000.** Sensitivity analysis for modules for various biosphere types. SKB-R-00-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-12 **Smith G M, Watkins B M, Little R H, Jones H M, Mortimer A M, 1996.** Biosphere modeling and dose assessment for Yucca Mountain. EPRI Palo Alto, CA. EPRI TR-107190.
- 20-13 **BIOMOVS II, 1996.** Development of reference biospheres methodology for radioactive waste disposal. TR6, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-14 **Sansone U, Belli M, Jeran Z, Kanivets V V, Radojko J, Riccardi M, Voitsekhovitch OV, 2002.** Suspended particle adhesion on aquatic plant surfaces: implications for ¹³⁷Cs and ¹³³Cs uptake rates and water-to-plant concentration ratios. Journal of Environmental Radioactivity. 59(3): pp 257–271.
- 20-15 **Boisson F, Hutchins DA, Fowler SW, Fisher NS, Teyssie J-L, 1997.** Influence of temperature on the accumulation and retention of 11 radionuclides by the marine alga *Fucus vesiculosus* (L.)*1. Marine Pollution Bulletin. 35(7-12): pp 313–321.
- 20-16 **Zach R, 1997.** Nuclear fuel waste management – Biosphere program highlights – 1978 to 1996. AECL Pinawa, Manitoba, Canada. AECL -11811.
- 20-17 **Kumblad L, 2004.** Radionuclides in the Baltic Sea: Ecosystem models and experiments on transport and fate, Phd Thesis, Stockholm University, Department of Systems Ecology.
- 20-18 **Nordlinder S, Bergström U, Mathiasson L, 1999.** Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 20-19 **Kautsky U (ed), 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area. SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-20 **Kumblad L, 1999.** A carbon budget for the aquatic ecosystem above SFR in Öregrundsgrepen. SKB R-99-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-21 **Kumblad L, 2001.** A transport and fate model of carbon-14 in a bay of the Baltic Sea at SFR. Today and in the future. SKB TR-01-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-22 **Kumblad L, Gilek M, Naeslund B, Kautsky U, 2003.** An ecosystem model of the environmental transport and fate of carbon-14 in a bay of the Baltic sea, Sweden. *Ecological modelling* 166(2003): pp 193–210.
- 20-23 **Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Effects of land-rise on the development of a coastal ecosystem of the Baltic Sea and its implementations for the long-term fate of ¹⁴C discharges. *Hydrobiologia*. 514(1): pp 185–196.
- 20-24 **Kumblad L, Kautsky U, Naeslund B, 2004.** Transport and fate of radionuclides in aquatic environments – the use of ecosystem modelling for exposure assessments of nuclear facilities. Manuscript in Kumblad L, 2004. Radionuclides in the Baltic Sea: Ecosystem models and experiments on transport and fate, Phd Thesis, Stockholm University.
- 20-25 **Nilsson A-C, Karlsson K, Borgiel M, 2003.** Forsmark site investigation. Sampling and analyses of surface waters. Results from sampling in the Forsmark area, March 2002 to March 2003. SKB P-03-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-26 **Nilsson E, 2001.** A preliminary carbon budget for two oligotrophic hardwater lakes in the Forsmark area, Sweden. SKB R-01-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-27 **Nilsson E, 2001.** Methods to measure biomass and production of bacteria and photosynthetic microbiota and their application on illuminated lake sediments. A literature study. SKB R-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-28 **Sandberg J, 2004.** Test of the suitability of ECOPATH/ECOSIM modelling software as a compliment to estimate flows of carbon, C-14 and radionuclides in the Öregrundsgrepen area. SKB R-04-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-29 **Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Three dynamic models for the transport and fate of carbon, nutrients and point source released radionuclides to an aquatic ecosystem. SKB TR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-30 **Jones J, Vahlund F, Kautsky U, 2004.** Tensit – A novel probabilistic simulation tool for safety assessments – Tests and verifications using biosphere models. SKB TR-04-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-31 **Engqvist A, Andrejev O, 1999.** Water exchange of Öregrundsgrepen – A baroclinic 3D-model study. SKB TR-99-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-32 **Engqvist A, Andrejev O, 2000.** Sensitivity analysis with regard to variations of physical forcing including two possible future hydrographic regimes for the Öregrundsgrepen. A follow-up baroclinic 3D-model study. SKB TR-00-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-33 **Engqvist A, Stenström P, 2004.** Archipelago strait exchange processes – An overview. *Deep Sea Res.* (in press).
- 20-34 **Engqvist A, Andrejev O, 2003.** Water exchange of the Stockholm archipelago – a cascade framework modelling approach. *J. Sea Research*. 49: pp 275–294.
- 20-35 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR, Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-36 **Holmén J, Forsman J, 2004.** Flow of groundwater from great depths in the near surface deposits; modelling of a local domain in northeast Uppland. SKB R-04-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-37 **Elert M, Argärde AC, Ericsson A-M, 1988.** Modelling of the interface between the geosphere and the biosphere: Discharge through a soil layer. Kemakta AB Stockholm. Kemakta AR 88-23.
- 20-38 **Widén E, 2001.** Groundwater flow into and out of two lakes partly surrounded by peatland.: Division of land and water resources. Royal Institute of Technology. Thesis report series 2001:6.
- 20-39 **Widén E, Jansson P-E, Espeby B, Olofsson B, 2004.** Estimations of the water flows to lake Hällefjärd and lake Eckarfjärden, northern Uppland. SKB R-04-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-40 **Jarsjö J, Shibuo Y, Destouni G, 2004.** Using PCRaster-POLFLOW approach to GIS-based modelling of coupled groundwater-surface water hydrology in the Forsmark area. SKB R-04-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-41 **Kumblad L, 2002.** The use of ecosystem models in ecological risk assessments of radionuclides. Licentiate thesis. Stockholm University, Dept Systems Ecology.
- 20-42 **Kumblad L, Bradshaw C, Gilek M, 2004.** Bioaccumulation of Ni-63, Cr-51 and C-14 in Baltic Sea benthos. *Environmental Pollution*. (in press).
- 20-43 **Brydsten L, 2004.** A mathematical model for lake ontogeny in terms of filling with sediments and macrophyte vegetation. SKB TR-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-44 **Brunberg A-K, Blomkvist P, 2003.** Ontogeny of lake ecosystems in the Forsmark area – chemical analyses of deep sediment cores. SKB R-03-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 20-45 **Bergström L, 2001.** Late Holocene distribution of lake sediment and peat in NE Uppland, Sweden. SKB R-01-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-46 **Hedenström A, Risberg J, 2003.** Shore line displacement in northern Uppland during the last 6500 calendar years. SKB-TR-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-47 **Boresjö Bronge L, Wester K, 2003.** Vegetation mapping with satellite data of the Forsmark, Tierp and Oskarshamn regions. SKB P-03-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-48 **Avila R, Moberg L, Hubbard L, 1998.** Modelling of radionuclide migration in forest ecosystems. A literature review. SSI-rapport 98:07, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-49 **IAEA, 2002.** Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. Report of the Forest Working Group of BIOMASS Theme 3 BIOMASS: The International Atomic Energy Agency Programme on BIOSphere Modelling and ASSESSMENT. International Atomic Energy Agency Vienna (Austria). IAEA-BIOMASS-1.
- 20-50 **Brunberg A-K, Blomqvist P, 1998.** Vatten i Uppsala län 1997 – Beskrivning, utvärdering, åtgärdsförslag. Upplandsstiftelsen Uppsala. Rapport nr 8/1998
- 20-51 **Kozak JA, Reeves HW, Lewis BA, 2003.** Modeling radium and radon transport through soil and vegetation. *Journal of Contaminant Hydrology*. 66: pp 179–200.
- 20-52 **Jansson P-E, Karlberg L, 2001.** Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering: p 321.
- 20-53 **Abrahamsson T, 2003.** Forsmark site investigation. Vegetation inventory in part of the municipality of Östhammar. SKB P-03-81, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-54 **Fridriksson G, Öhr J, 2003.** Assessment of plant biomass of the ground, field and shrub layers of the Forsmark area. SKB P-03-90, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-55 **Lundin L, Lode E, Stendahl J, Melkerud P-A, Björkvald L, Thorstensson A, 2004.** Soils and site types in the Forsmark area. SKB R-04-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-56 **Boresjö Bronge L, 2004.** Satellite remote sensing for estimating leaf area index, FPAR and primary production. A literature review. SKB R-04-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-57 **Posiva, 2003.** Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Programme for research, development and technical design for 2004–2006. TKS-2003. Posiva OY Olkiluoto, Finland.
- 20-58 **Brunberg A-K, Blomqvist P, 1999.** Characteristics and ontogeny of oligotrophic hardwater lakes in the Forsmark area, central Sweden. SKB R-99-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-59 **Brunberg A-K, Blomqvist P, 2000.** Post-glacial, land rise-induced formation and development of lakes in the Forsmark area, central Sweden. SKB TR-00-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-60 **Brydsten L, 1999.** Shore line displacement in Öregrundsgrepen. SKB TR-99-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-61 **Kellner E, 2003.** Wetlands – different types, their properties and functions. SKB TR-04-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-62 **Bergström U, Barkefors C, 2004.** Irrigation in dose assessments models. SKB R-04-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-63 **Kautsky U, 1995.** Ecosystem processes in coastal areas of the Baltic Sea. Ph. D. thesis, Dept. Zoology, Stockholm University. p 124.
- 20-64 **Blomqvist P, Nilsson E, Brunberg A-K, 2002.** Habitat distribution, water chemistry, and biomass and production of pelagic and benthic microbiota in Lake Eckarfjärden, Forsmark. SKB R-02-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-65 **Brunberg A-K, Nilsson E, Blomqvist P, 2002.** Characteristics of oligotrophic hardwater lakes in a postglacial land-rise area in mid Sweden. *Freshwater Biology*. 47: pp 1451–1462.
- 20-66 **Andersson E, Tudorancea M-M, Tudorancea C, Brunberg A-K, Blomqvist P, 2003.** Water chemistry, biomass and production of biota in lake Eckarfjärden during 2002. SKB R-03-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-67 **Blomqvist P, Brunberg A-K, Brydsten L, 2000.** Lake and lake-related drainage area parameters for site investigation program. SKB R-00-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-68 **Blomqvist P, Brunberg A-K, Brydsten L, 2001.** River and river-related drainage area parameters for site investigation program. SKB R-01-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-69 **Brydsten L, Carlsson T, Brunberg A-K, Blomqvist P, 2004.** A method for determination of morphometry, sediment distribution, and habitat diversity of lake basins and its application to three lakes in Uppland. SKB R-04-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-70 **Brunberg A-K, Carlsson T, Blomqvist P, Brydsten L, Strömgren M, 2004.** Identification of catchments, lake-related drainage parameters and lake habitats. SKB P-04-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-71 **Brunberg A-K, Blomqvist P, Rydin E, 2002.** Contrasting ontogeny among hardwater lakes as revealed by sediment P-fractionation. *Arch. Hydrobiol.* 153: pp 491–502.
- 20-72 **Blomqvist P, 2003.** Frekvens och areell utbredning av olika huvudhabitat som indikatorer för biologisk mångfald i sjöar. Förslag till indikatorer för biologisk mångfald i vatten, Stockholm, Sweden: Naturvårdsverket. Rapport 5257: p 78.

- 20-73 **Blomqvist P, Jansson P-E, Espeby B, Brunberg A-K, Olofsson B, Norrström A-C, Widén E, 2001.** Litoral produktion och sjöbäckens hydrologi. *Scripta Limnologica Upsaliensia*. B: 21: p 11.
- 20-74 **Sandman A, Kautsky H, 2004.** Plant and animal communities along the Swedish Baltic Sea coast – the building of a database of quantitative data collected by SCUBA divers, its use and some GIS applications in the Gräsö area. SKB R-04-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-75 **Fredriksson R, Tobiasson S, 2003.** Simpevarp site investigation. Inventory of macrophyte communities at Simpevarp nuclear power plant, Area of distribution and biomass determination. SKB P-03-69, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-76 **Brydsten L, 1999.** Change in coastal sedimentation conditions due to positive shore displacement in Öregrundsgrepen. SKB TR-99-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-77 **Hedenström A, 2003.** Forsmark site investigation. Investigation of marine and lacustrine sediment in lakes. SKB P-03-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-78 **Sohlenius G, Hedenström A, Rudmark L, 2004.** Forsmark site investigation. Mapping of unconsolidated Quaternary deposits 2002–2003 Map description. SKB R-04-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-79 **Risberg J, 2002.** Holocene sediment accumulation in the Äspö area. A study of a sediment core. SKB R-02-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-80 **Bergkvist M, Ekström L, Eriksson K, Hammarlund E, Hollsten M, Lind A-L, Lundholm K, 2003.** Kallrigafjärden, NO Uppland. Områdets historia, nuläge samt framtida landskapsutveckling. SKB R-03-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-81 **Påsse T, 1997.** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia. SKB TR 97-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-82 **Morén L, Påsse T, 2001.** Climate and shoreline in Sweden during the Weichsel and the next 150 000 years. SKB TR-01-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-83 **Adcock S T, Dukes M D G, Goodess C M, Palutikof J P, 1997.** A critical review of the climate literature relevant to the deep disposal of radioactive waste. NIREX Oxfordshire, United Kingdom. S/97/009.
- 20-84 **Milne G A, Davis J L, Mitrovica J X, Scherneck H-G, Johansson J M, Vermeer M, Koivula H, 2001.** Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia. *Science*. 291: pp 2381–2385.
- 20-85 **Berger A, Loutre MF, Gallee H, 1996.** Sensitivity of the LLN 2-D climate model to the astronomical and CO₂ forcings (from 200 kyr BP to 130 ky AP). Univ. Catholique de Louvain Louvain-la-Neuve, Belgium. Scientific report 1996/1.
- 20-86 **Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 1999.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-87 **Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-88 **Westman P, Wastegård S, Schoning K, Gustafsson B, Omstedt A, 1999.** Salinity change in the Baltic Sea during the last 8,500 years: evidence, causes and models. SKB TR-99-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-89 **Gustafsson B, 2004.** Millennial changes of the Baltic Sea salinity. Studies of the sensitivity of the salinity to climate change. SKB TR-04-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-90 **Gustafsson B, Westman P, 2002.** On the causes for salinity variations in the Baltic Sea during the last 8500 year. *Paleoceanography*. 17(3): pp 12, 1–14.
- 20-91 **Lundmark A, Andersson M, Andersson M, Byström M, Johansson J, Isaksen N, 2002.** Miljö- och klimatförändringar i östra Mellansverige under de senaste 8000 åren – biostratigrafiska och geokemiska undersökningar av en mosse i östra Uppland. Inst. Naturgeografi och Kvärtärgeologi, Stockholms Universitet.
- 20-92 **Gunnarson BE, Borgmark A, Wastegård S, 2003.** Holocene humidity fluctuations in Sweden inferred from dendrochronology and peat stratigraphy. *Boreas*. 32: pp 347–360.
- 20-93 **Hohl V, 2003.** Klimatförändringar under de senaste 6500 åren, humifieringsförändringar i torv från Lilla Backsjömyren i Jämtland. Inst Naturgeografi och Kvärtärgeologi Stockholms Universitet. Examensarbete K-2.
- 20-94 **Hedenström A, 2001.** Early Holocene shore displacement in eastern Svealand, Sweden, based on diatom stratigraphy, radiocarbon chronology and geochemical parameters. *Quaternaria*, Stockholm, Sweden: Dept. Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm Univ. Ser A: Thesis and Research Papers No 10.
- 20-95 **IAEA, 2003.** Modelling the transfer of radionuclides to fruit. Report of the Fruits Working Group of BIOMASS Theme 3. Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria). IAEA-BIOMASS-5 (IAEABIOMASS5).

- 20-96 **IAEA, 2003.** 'Reference Biospheres' for solid radioactive waste disposal. Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSESSment (BIOMASS) Programme. Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). International Atomic Energy Agency Vienna (Austria).
- 20-97 **Wood M D, Knowles J D, Whittaker J H, Copplestone D, Malcom H M, Bielby S, 2003.** Developing experimental protocols for chronic irradiation studies on wildlife. Environment Agency Bristol, UK. R&D Technical Report P3-101/SP2.
- 20-98 **Kelly M, Thorne M, 2003.** Radionuclides handbook. Environment Agency Bristol, UK. R&D Technical Report P3-101/SP1b.
- 20-99 **Copplestone D, Wood MD, Bielby S, Jones SR, Vives J, Beresford NA, 2003.** Habitats regulations for Stage 3 assessments: radioactive substances authorisation. Environment Agency Bristol, UK. R&D Technical Report P3-101/SP1a.
- 20-100 **Clarke R, 1999.** Control of low-level radiation exposure: time for a change? *J. Radiol. Prot.* 19: pp 107–115.
- 20-101 **Swarén U, 2003.** The Swedish ICRP Project – A presentation. *J. Rad. Protection.* 23(2): pp 195–200.
- 20-102 **Alm Carlsson G, Bergman R, Harms-Ringdahl M, Swarén U, 2002.** The Swedish ICRP Project. A radiological protection policy under discussion. Case studies. The Analys Group, KSU AB (Nuclear Training and Safety Centre), Studsvik, Sweden; Svensk Kärnbränslehantering AB, KSU AGR B-02/1-ENG-SE.
- 20-103 **Kautsky U, 2003.** The biosphere research at SKB. Radiation protection in the 2000s – theory and practice. Nordic Society for Radiation Protection. Proceedings of the XIII ordinary meeting, Turku/Åbo, Finland, August 25–29, 2002, W Paile (ed), STUK-A195, 2003, pp 145–152.
- 20-104 **Kautsky U, Gilek M, 2003.** Radiation effects on the environment beyond the level of individuals. 3rd international symposium on the protection of the environment from ionising radiation (SPEIR 3), Darwin (Australia). C and S papers series no 17/P.
- 20-105 **Kumblad L, Kautsky U, Gilek M, 2000.** Including ecosystem dynamics in risk assessment of radioactive waste in coastal regions. International conference on the safety of radioactive waste management, Cordoba (Spain). pp 250–253.
- 20-106 **Dverstorp B, Sundström B, 2003.** SSI:s och SKI:s granskning av SKB:s uppdaterade Slutlig Säkerhetsrapport för SFR 1 Granskningsrapport. SSI-rapport 2003:21, Statens strålskyddsinstitut. SKI Rapport 2003:37, Statens kärnkraftinspektion.
- 20-107 **Wörman A, 2003.** Exchange processes at geosphere-biosphere interface. Current SKB approach and example of coupled hydrological-ecological approach. SSI-rapport 2003:14, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-108 **Egan M J, Thorne M C, Little R H, Pasco R F, 2003.** Analysis of critical issues in biosphere assessment modelling and site investigation. SSI-rapport 2003:12, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-109 **Egan M J, Maul P R, Watkins B M, Venter A, 2001.** Work in support of biosphere assessments for solid radioactive waste disposal. 2. Biosphere FEP list and biosphere modelling. SSI-rapport 2001:22, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-110 **Egan M J, Loose M, Smith G M, Watkins B M, 2001.** Work in support of biosphere assessments for solid radioactive waste disposal. 1. Performance assessments, requirements and methodology; criteria for radiological environmental protection. SSI-rapport 2001:21, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-111 **Shaw G, 2002.** A Review of models for dose assessment employed by SKB in the renewed safety assessment for SFR 1. SSI-rapport 2002:18, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-112 **Klos R, Wilmot R, 2002.** Review of Project SAFE: Comments on biosphere conceptual model description and risk assessment methodology. SSI-rapport 2002:17, Statens strålskyddsinstitut.
- 20-113 **Borgiel M, 2003.** Makroskopiska organismers förekomst i sedimentprov. En översiktlig artbestämning av makroskopiska organismer. SKB P-03-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-114 **Larsson-McCann S, Karlsson A, Nord M, Sjögren J, Johansson L, Ivarsson M, Kindell S, 2002.** Meteorological, hydrological and oceanographical information and data for the site investigation program in the communities of Östhammar and Tierp in the northern part of Uppland. SKB TR-02-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-115 **Larsson-McCann S, Karlsson A, Nord M, Sjögren J, Johansson L, Ivarsson M, Kindell S, 2002.** Meteorological, hydrological and oceanographical information and data for the site investigation program in the community of Oskarshamn. SKB TR-02-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-116 **Tobiasson S, 2003.** Tolkning av undervattensfilm från Forsmark och Simpevarp. SKB P-03-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-117 **Aquilonius K, Karlsson S, 2003.** Forsmark site investigation. Snow depth, frost in ground and ice cover during the winter 2002/2003. SKB P-03-117, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-118 **Berggren J, Kyläkorpi L, 2002.** Ekosystemen i Tierp Norra. Sammanställning av befintlig information. SKB R-02-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-119 **Berggren J, Kyläkorpi L, 2002.** Ekosystemen i Simpevarpsområdet. Sammanställning av befintlig information. SKB R-02-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- 20-120 **Berggren J, Kyläkorpi L, 2002.** Ekosystemen i Forsmarksområdet. Sammanställning av befintlig information. SKB R-02-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-121 **Boresjö Bronge L, Wester K, 2002.** Vegetation mapping with satellite data of the Forsmark and Tierp regions. SKB R-02-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-122 **Cederlund G, Hammarström A, Wallin K, 2003.** Surveys of mammal populations in the areas adjacent to Forsmark and Tierp. SKB P-03-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-123 **Sturesson E, 2003.** Platsundersökning Oskarshamn. Nyckelbiotopsinventering i Simpevarpsområdet. SKB P-03-78, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 20-124 **Greger M, 2004.** Uptake of nuclides by plants. SKB TR-04-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 21

- 21-1 **Bioclim, 2002.** Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Deliverable D2: Consolidation of Needs of the European Waste management Agencies and the regulator of the Consortium. The EC Bioclim Project within the 5th Euroatom Framework Programme.
- 21-2 **Bioclim, 2003.** Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. The EC Bioclim Project within the 5th Euroatom Framework Programme. Joint Final Seminar. Luxembourg, November 2003.
- 21-3 **Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-4 **Bioclim, 2001.** Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Deliverable D1: Environmental Change analysis. The EC Bioclim Project within the 5th Euroatom Framework Programme.
- 21-5 **Sweclim, 2002.** Årsrapport 2002. Det svenska klimatforskningsprogrammet SWECLIM, SMHI, Norrköping (<http://www.smhi.se/sweclim/>).
- 21-6 **IPCC, 2001.** Climate change 2001. Synthesis Report, A contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Watson R T and the Core Writing Team), Cambridge University Press, Cambridge.
- 21-7 **Milne G A, Davis J L, Mitrovica J X, Scherneck H-G, Johansson J M, Vermeer M, Koivula H, 2001.** Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia. *Science*, 291, pp 2381–2385.
- 21-8 **Milne G A, 2002.** Recent Advances in Predicting Glaciation-Induced Sea-Level Changes and Their Impact on Model Applications in Glacial Isostatic Adjustment and the Earth System: Sea Level, Crustal Deformation, Gravity and Rotation. AGU monograph, Geodynamics Series 29, pp 157–176.
- 21-9 **Lokrantz H, Sohlenius G, 2004.** Weichselian glaciation history in Scandinavia, a literature review. SKB R-XX-XX, Svensk Kärnbränslehantering AB, (i manus).
- 21-10 **Greve R, Hutter K, 1995.** Polythermal three-dimensional modelling of the Greenland Ice Sheet with varied geothermal heat flux. *Annals of Glaciology* 21, pp 8–12.
- 21-11 **Näslund J O, 1997.** Subglacial preservation of valley morphology at Amundsenisen, western Dronning Mauds Land, Antarctica. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(5), pp 441–455.
- 21-12 **Johnson J, Fastook J L, 2002.** Northern Hemisphere glaciation and its sensitivity to basal melt water. *Quaternary International* 95–96, pp 65–74.
- 21-13 **Näslund J O, Jansson P, Fastook J L, Johnson J, Andersson L, 2004.** A First realistic dataset on distributed geothermal heat flow for ice sheet modelling. Abstract inskickat till European Geosciences Union 1st General Assembly, Nice, Frankrike, 25–30 April 2004.
- 21-14 **Näslund J O, Jansson P, Fastook J L, Johnson J, 2004.** Modelling ice sheet basal meltwater production using realistic geothermal heat flow data. Abstract inskickat till International Symposium on Ice and Water Interactions: Processes across the Phase Boundary Portland State University, Oregon, USA, 26–30 July 2004.
- 21-15 **Fastook J L, 1993.** The finite-element method for solving conservation equations in glaciology. *Computational Science and Engineering* 1(1), pp 55–67.
- 21-16 **Fastook J L, Prentice M, 1994.** A finite-element model of Antarctica: Sensitivity test for meteorological mass-balance relationship. *Journal of Glaciology*, 40(134), pp 167–175.
- 21-17 **Näslund J O, Rodhe L, Fastook J L, Holmlund P, 2003.** New ways of studying ice sheet flow directions and glacial erosion by computer modelling; examples from Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews*, 22(2–4), pp 245–250.
- 21-18 **Boulton G, Chan T, Christiansson R, Ericsson L-O, Hartikainen J, Jensen M R, Stanchell F W, Wallroth T, 2003.** Thermo-hydro-mechanical impacts of glaciation and implications for deep geologic disposal of nuclear waste. *GeoProc2003*, Stockholm, pp 289–294.
- 21-19 **Chan T, Stanchell F W, Wallroth T, Hernelind J, Boulton G, 2003.** A finite-element study of potential coupled hydromechanical effects of glaciation on a crystalline rock mass. *GeoProc2003*, Stockholm, pp 277–282.

- 21-20 **Jansson P, 1995.** Water pressure and basal sliding, Storglaciären, Sweden. *J. Glaciol.* 41 (138), pp 232–240.
- 21-21 **Jansson P, 1996.** Dynamics and hydrology of a small polythermal valley glacier. *Geogr. Ann.* 78A (4), pp 171–180.
- 21-22 **Vidstrand P, 2003.** Surface and subsurface conditions in permafrost areas – a literature review. SKB TR-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 21-23 **Ruskeeniemi T, Paananen M, Ahonen L, Ahonja J, Kuivamäki A, Frapé S, Morén L, Degnan P, 2002.** Permafrost at Lupin, Report phase I. GTK Report YST112, GTK, Finland.
- 21-24 **Aalto J, Hartikainen J, 2004.** DECOVALEX III, Permafrost modelling in BMT3. Research reports on the Laboratory of Structural Mechanics, TKK-RM-04-03, Helsinki University of Technology.

Kapitel 22

- 22-1 **SKB, 1997.** Långsiktig förvaring av Sveriges använda kärnbränsle. SKB:s perspektiv på beslutsprocessen. SKB R-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-2 **Fredriksson C, Gramner C, 1998.** Förstudie Oskarshamn. Omvärldsanalys för Oskarshamn. SKB R-98-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-3 **Inregia AB, 1998.** Förstudie Oskarshamn. Djupförvar i Oskarshamn – Socioekonomiska konsekvenser. SKB R-98-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-4 **Sjöberg L, 2001.** Riskkattityder och inställningen till djupförvar för använt kärnbränsle i fyra kommuner. SKB R-01-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-5 **Fredriksson C, 1994.** Förstudie Storuman. Inför tusenårsskiftet – ett omvärldsperspektiv. SKB PR 44-94-020, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-6 **Johnsdotter M, Lindgren G, 1994.** Förstudie Malå. Turismens utveckling med eller utan ett djupförvar. SKB PR 44-94-041, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-7 **Holm E, Lindgren U, 1995.** Förstudie Malå. Socioekonomiska konsekvenser av ett djupförvar för använt kärnbränsle. SKB PR D-95-001, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-8 **Fredriksson C, Björne S, 1996.** Förstudie Östhammar. Näringslivsutveckling/Omvärldsanalys, Östhammar – kommunen där det gamla möter det nya. SKB PR D-96-020, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-9 **Strömquist U, Pleiborn M, 1996.** Förstudie Östhammar. Konsekvenser för bosättning och sysselsättning. SKB PR D-96-021, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 22-10 **Lidskog R (ed), 1998.** Kommunen och kärnavfallet. Svensk kärnavfallspolitik på 1990-talet. ISBN 91 7203 250 2.
- 22-11 **Lundgren N-G, 1994.** Att deponera kärnavfall – Hot eller lokal utvecklingsmöjlighet. Tekniska högskolan i Luleå, TULEA 1994:08.

Kapitel 23

- 23-1 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt bränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-2 **SKI, 2002.** SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2001. SKI Rapport 02:9, Statens kärnkraftinspektion.
- 23-3 **Kasam, 2002.** Kärnavfall – forskning och teknikutveckling. KASAM:s yttrande över SKB:s FUD-program 2001, SOU 2002:63.
- 23-4 **Ahlström P-E (editor), 2004.** Partitioning and transmutation: Current developments – 2004. A report from the Swedish reference group on P&T-research. SKB TR-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-5 **Enarsson Å, Landgren A, Liljenzin J-O, Skålberg M, Spjuth L, Gudowski W, Wallenius J, 1998.** Separation och transmutation (S&T) 1997. En genomgång av nuläget. SKB R-98-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-6 **NEA, 1999.** Actinide and Fission Product Separation and Transmutation, Status and Assessment Report (Synthèse des travaux). OECD/NEA report.
- 23-7 **DOE, 1999.** A Roadmap for Developing Accelerator Transmutation of Waste (ATW) Technology. A Report to Congress. DOE/RW-0519.
- 23-8 **DOE, 2003.** Report to Congress on Advanced Fuel Cycle Initiative: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research. US Department of Energy Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, January 2003 (http://www.ne.doe.gov/reports/AFCI_CongRpt2003.pdf).
- 23-9 **TWG, 2001.** A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration. April 2001. Report prepared by European technical working group of experts on ADS under chairmanship of Carlo Rubbia.
- 23-10 **NEA, 2002.** Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. OECD/NEA report.

- 23-11 **Andersson S, Ekberg C, Enarsson Å, Liljenzin J-O, Mesmin C, Nilsson M, Skarnemark G, 2001.** Partitioning and transmutation. Annual Report 2000. SKB R-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-12 **Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, 2001.** System and safety studies of accelerator driven transmutation systems. Annual Report 2000. SKB R-01-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-13 **Blomgren J, Johansson C, Klug J, Olsson N, Pomp S, Renberg P-U, 2001.** Nuclear data for accelerator-driven transmutation. Annual Report 2000/2001. SKB R-01-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-14 **Andersson S, Ekberg C, Enarsson Å, Liljenzin J O, Mesmin C, Nilsson M, Skarnemark G, 2002.** Partitioning and transmutation. Annual Report 2001. SKB R-02-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-15 **Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, Chakarova R, Westlén D, 2002.** System and safety studies of accelerator driven transmutation. Annual Report 2001. SKB R-02-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-16 **Blomgren J, Johansson C, Klug J, Olsson N, Pomp S, Renberg P-U, 2002.** Nuclear data for accelerator-driven transmutation. Annual Report 2001/2002. SKB R-02-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-17 **Andersson S, Ekberg C, Liljenzin J-O, Nilsson M, Rogues N, Skarnemark G, Östberg J, 2003.** Partitioning and Transmutation. Annual Report 2002. SKB R-03-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-18 **Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, Chakarova R, Jollkonen M, Westlén D, 2003.** System and safety studies of accelerator-driven transmutation. Annual Report 2002. SKB R-03-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-19 **Blomgren J, Hildebrand A, Mermod P, Olsson N, Pomp S, Österlund M, 2003.** Neutron data for accelerator-driven transmutation technologies. Annual Report 2002/2003. SKB R-03-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-20 **Andersson S, Ekberg C, Liljenzin J-O, Nilsson M, Skarnemark G, 2004.** Partitioning and Transmutation. Annual Report 2003. SKB R-04-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-21 **SKB, 2000.** Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. SKB R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-22 **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.
- 23-23 **Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information related to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 23-24 **Kessels W, Kück J, 1995.** Hydraulic communication in crystalline rocks between the two boreholes of the Continental Deep Drilling Project in Germany. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 32(1), pp 37-47.
- 23-25 **Harrison T, 2000.** Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 24

- 24-1 **SKB, 20004.** Plan 2004. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 24-2 **Hedin G, Gustavsson B, Carlsson J, 2004.** Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk. SKB R-04-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kapitel 25

- 25-1 **SKB, 1999.** Djupförvar av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-2 **SKI, 2002.** SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2001. SKI Rapport 02:9, Statens kärnkraftinspektion.
- 25-3 **Chapman N, Apted M, Glasser F, Kessler J, Voss C, 2000.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall i Sverige (SFL 3–5). En internationell expertgranskning av SKB:s preliminära säkerhetsanalys. SKI Rapport 00:54, Statens kärnkraftinspektion.
- 25-4 **SKI, SSI, 2001.** SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SKB:s preliminära säkerhetsanalys för slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Granskningsrapport. SKI Rapport 01:14, Statens kärnkraftinspektion. SSI-rapport 2001:10, Statens strålskyddsinstitut.
- 25-5 **Glaus M A, Van Loon L R, 2004.** Cellulose degradation at alkaline conditions: Long-term experiments at elevated temperatures. PSI Bericht 04-01, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, or Nagra Technical Report NTB 03-08, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- 25-6 **Pavasars I, 1999.** Characterisation of organic substances in waste materials under alkaline conditions. Doctoral Thesis, University of Linköping, Linköping Studies in Art and Science, 196, Linköping, ISBN 91-7219-485-5.

- 25-7 **Ekberg S, Ekberg C, Albinsson Y, 2003.** Characterisation of α -isosaccharinic acid: pK_a -determination. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 757 (eds R J Finch and D B Bullen), Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 503–508.
- 25-8 **Dario M, Molera M, Allard B, 2004.** Effects of Cement Additives on Radionuclide Mobility. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 639–644.
- 25-9 **Glaus M A, Van Loon L R, 2004.** A generic procedure for the assessment of the effect of concrete admixtures on the retention behaviour of cement for radionuclides: Concept and case studies. PSI Bericht 04-02, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland or Nagra Technical Report NTB 03-09, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- 25-10 **Dario M, Molera M, Allard B, 2004.** Effects of Technical Adsorbents and Cleaning Agents in a Cement Matrix – A case study. In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 371–376.
- 25-11 **Höglund L O, 2001.** Project SAFE. Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-12 **Trägårdh J, Lagerblad B, 1998.** Leaching of 90-year old concrete mortar in contact with stagnant water. SKB TR-98-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-13 **Lagerblad B, 2001.** Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions. SKB TR-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-14 **Smellie J A T (ed), 1998.** Maqarin natural analogue study: Phase III. Vol I and II, SKB TR-98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 25-15 **Dickson C L, Brew D R M, Glasser F P, 2004.** Solubilities of CaO-SiO₂-H₂O phases at 25°, 55° and 85°C. Adv. Cement Res. 16, pp 35–43.
- 25-16 **Mäder U, Frieg B, Puigdomenech I, Decombarieu M, Yui M, 2004.** Hyperalkaline Cement Leachate-Rock Interaction and Radionuclide Transport in a Fractured Host Rock (HPF Project). In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol 807, pp 861–866.
- 25-17 **Pfingsten W, Soler J M, 2003.** Modelling of nonreactive tracer dipole tests in a shear zone at the Grimsel test site. Journal of Contaminant Hydrology 61, pp 387–403.
- 25-18 **Källvenius G, Ekberg C, 2003.** TACK – a program coupling chemical kinetics with a two-dimensional transport model in geochemical systems. Comput. & Geosci. 29, pp 511–521.

SKB:s handlingsplan

| | | |
|-----------|---|-----|
| A1 | Introduktion | 361 |
| A1.1 | Bakgrund | 361 |
| A1.2 | Utgångspunkter | 362 |
| A2 | Program för använt kärnbränsle | 363 |
| A2.1 | Översikt | 363 |
| A2.2 | Samråd och miljökonsekvensbeskrivning | 367 |
| A2.3 | Systemutformning | 369 |
| A2.3.1 | Grundläggande krav, konstruktionsförutsättningar | 369 |
| A2.3.2 | Systemanalys och optimering | 369 |
| A2.3.3 | Långsiktig säkerhet | 371 |
| A2.3.4 | Alternativet horisontell deponering, KBS-3H | 373 |
| A3 | Inkapsling | 376 |
| A3.1 | Översikt | 376 |
| A3.2 | Anläggningsprojektering | 380 |
| A3.2.1 | Inkapslingsanläggningen | 380 |
| A3.2.2 | Kapseltillverkning | 380 |
| A3.3 | Kapselutveckling | 380 |
| A3.3.1 | Förslutning | 380 |
| A3.3.2 | Kapselkomponenter | 381 |
| A3.3.3 | Tillverkning | 382 |
| A3.4 | Säkerhetsanalys | 382 |
| A3.5 | Kvalificering | 383 |
| A4 | Djupförvaring | 383 |
| A4.1 | Översikt | 383 |
| A4.2 | Platsundersökningar | 387 |
| A4.2.1 | Forsmark | 387 |
| A4.2.2 | Oskarshamn | 388 |
| A4.3 | Anläggningsprojektering | 389 |
| A4.4 | Teknikutveckling | 394 |
| A4.5 | Säkerhetsanalys | 398 |
| A4.6 | Utvärdering och platsval | 398 |
| A4.6.1 | Lokaliseringsfaktorer | 399 |
| A4.6.2 | Platsval | 400 |
| A4.6.3 | Alternativa scenarier | 400 |
| A5 | Program för låg- och medelaktivt avfall (Loma) | 401 |
| A5.1 | Nuläge | 401 |
| A5.2 | Plan | 401 |
| A5.2.1 | Slutförvaring – kortlivat avfall | 402 |
| A5.2.2 | Mellanlagring – hårdkomponenter | 402 |
| A5.2.3 | Utbyggnader vid SFR | 403 |
| A5.2.4 | Slutförvar för annat långlivat avfall | 403 |
| A6 | Ledning, kvalitet och kompetens | 403 |
| A6.1 | Organisation och ledningssystem | 403 |
| A6.2 | Kompetensförsörjning | 405 |

A1 Introduktion

A1.1 Bakgrund

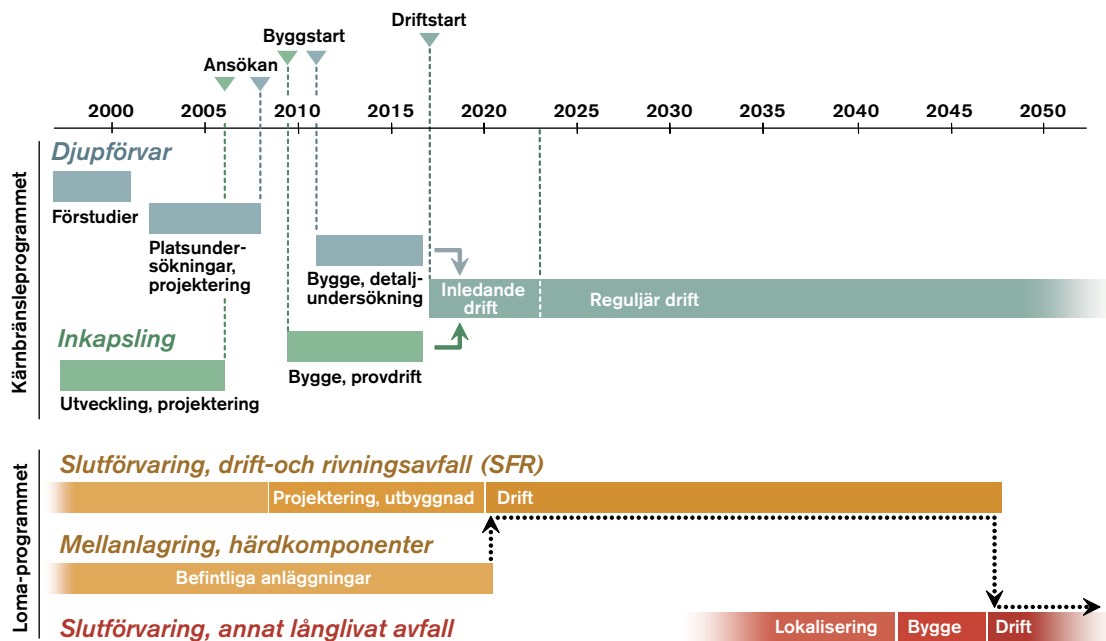
De politiska ramarna för den nuvarande etappen av kärnbränsleprogrammet klargjordes i och med regeringsbeslutet i november 2001 om SKB:s samlade redovisning av metod och platsval (FUD-K), följt av de berörda kommunernas beslutsprocesser om det egna deltagandet, slutförd i april 2002. Med de yttre förutsättningarna sålunda fastlagda, men fortfarande stor planeringsmässig handlingsfrihet inom dessa ramar, fanns det anledning för SKB att göra en översyn och anpassning av program och planer. I första hand gällde detta platsundersökningsskedet, det vill säga etappen fram till dess att tillståndsansökningarna för inkapslingsanläggningen och djupförvaret godkännts. De många tids- och verksamhetsmässiga kopplingarna till planeringen på längre sikt, och till övriga delar av programmet, motiverade emellertid att genomgången utsträcktes till att omfatta hela SKB:s verksamhet.

Granskningen av Fud-program 2001 föranledde kompletteringar av programgenomgången. I det yttrande över Fud-programmet som SKI lämnade till regeringen i mars 2002 efterfrågade myndigheten ett dokument från SKB som tydligare klargjorde planeringen för återstoden av kärnbränsleprogrammet. Som huvudmotiv för denna begäran angav SKI att berörda myndigheter behöver få klarlagt vilka granskningar som förväntas under de närmaste tio åren och hur de beror av varandra. Detta ansågs framför allt nödvändigt för myndigheternas egen planering, men också för att i andra sammanhang beskriva hur SKB ska uppnå målet för en säker slutförvaring av kärnavfallet. SSI hade tidigare, i sitt remissutlåtande över Fud-program 2001, framfört liknande synpunkter men med motiveringar som mera betonade behovet av att klargöra kopplingar mellan SKB:s Fud-verksamhet och genomförandet av kärnbränsleprogrammet, för att därmed bättre kunna bedöma om den forskning och utveckling som SKB redovisar är ändamålsenlig och tillräcklig.

SKI föreslog i sitt yttrande till regeringen att ställa som villkor att SKB tog fram det begärda underlaget, med redovisning senast i samband med Fud-program 2004. Med detta som utgångspunkt framförde regeringen i ett beslut från december 2002 att man ”förutsätter att SKB för en dialog med berörda myndigheter och kommuner och att en redogörelse för SKB:s tidsplan med tillhörande handlingsplan rörande en säker slutförvaring av kärnavfallet ingår i FUD-program 2004”. Som framgått vid senare samråd och vid andra tillfällen delade SKB i allt väsentligt myndigheternas åsikter om behovet av tydligare handlingsplaner.

Mot denna bakgrund initierade SKB ett arbete för att genomlysna och uppdatera den egna planeringen på kort och lång sikt, samt att ta fram det av myndigheterna begärda underlaget. En milstolpe passerades under våren 2003 när SKB:s styrelse fattade beslut om en revidering av tidsplanen för kärnbränsleprogrammet. Motsvarande revidering har senare gjorts av programmet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall (Loma). De planer som tagits fram har redovisats vid olika samrådstillfällen. Det gäller den nämnda tidsplanen för hela djupförvarsprojektet, liksom planeringen för inkapsling, återstoden av platsundersökningarna, samt kommande system- och säkerhetsanalyser. Figur 1 visar huvuddragen i den långsiktiga plan som SKB nu arbetar efter.

Denna bilaga utgör den begärda handlingsplanen. Den redovisar och kommenterar SKB:s planering för en säker slutförvaring av kärnbränslet och övrigt radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken. Fokus ligger på genomförandet av kärnbränsleprogrammet och tidsperspektivet fram till 2008, med de tidsplaner, etappmål och kopplingar mellan programmets olika delar som finns. Loma-programmet redovisas översiktligt. När det gäller den forskning och utveckling som bedrivs eller planeras för att möjliggöra genomförandet hänvisas till huvudrapporten.



Figur 1. Huvuddragen i SKB:s långsiktiga plan.

A1.2 Utgångspunkter

Kärnavfallsprogrammet av i dag är resultatet av närmare 30 års kontinuerligt arbete. Under denna period har en stor del av det hanteringssystem för kärnavfall som landet behöver kunnat etableras och tas i drift. Det har skett med stöd av ett brett program för forskning och utveckling och en omfattande kompetensbank har genererats. För återstoden av programmet finns såväl konkreta planer som resurser och engagemang. Löpande fondering av medel i kärnavfallsfonden ger en stabil finansiering, utan motsvarighet inom andra industribranscher. Administrativt har programmet successivt funnit sina former och vilar nu på ett ändamålsenligt regelverk med en tydlig rollfördelning på såväl nationell nivå som i de kommuner som är särskilt berörda. På det politiska planet finns i dag en bred uppslutning bakom verksamheten.

Det som uppnåtts kan ses som ett mödosamt uppbyggt ”kapital”, som nu i flera avseenden bidrar till att driva programmet framåt. Med många år av kontinuerligt framåtskridande som referens tas denna hjälpande kraft lätt för given. Kapitalet kan emellertid gå förlorat, exempelvis om kontinuiteten bryts och kompetensen skingras. En central del av strategin för att komma vidare är därför att värna om och förvalta det som uppnåtts. Hur viktigt detta är framgår tydligt vid en jämförelse med situationen i många andra länder.

Lokaliseringen av de återstående anläggningarna i systemet bygger på en stegvis process med väl underbyggda och förankrade beslut. Processen är öppen för samhällets insyn och ger berörda kommuner frihet att avgöra om de vill delta eller ej. Denna modell har visat sig leda framåt, om än i något långsammare takt än vad som förutsågs när programmet initierades. Slutsatsen för SKB:s del är att den arbetsmodell som etablerats blir av stort värde när programmet nu går in i det skede där lokaliseringarna ska fullföljas. En viktig lärdom är att tillräckligt med tid ska avsättas för att i varje skede ta fram solida beslutsunderlag. Det gäller såväl inför de stora besluten om anläggningarnas lokaliseringar och senare drifttagande, som inför de många mindre beslut som ska fattas om exempelvis detaljer i anläggningarnas utformning. Tidtabellen måste också ge utrymme för insyn från omvärlden, samråd med berörda instanser och allmänhet och förankring av programmet i en demokratisk beslutsprocess. Samtidigt måste genomförandet ske med tillräcklig intensitet för att möta det för SKB grundläggande kravet att avfallet från kärnenergiprogrammet inte i onödan belastar framtida generationer. Ett annat motiv för en hög arbetstakt är strävan att ta tillvara kompetens och därmed befrämja kvaliteten i genomförandet.

En vägledande utgångspunkt för SKB:s planering för återstoden av programmet är att eftersträva en rimlig balans mellan å ena sidan de berättigade kraven på tid och utrymme för gedigna beslutsprocesser, å andra sidan den kontinuitet och intensitet som måste finnas om programmet ska bli genomfört med bra resultat. Denna inställning förutsätts prägla arbetssättet även hos de aktörer som har huvudrollerna i samband med tillståndsprocesserna.

Kärnbränsleprogrammet

KBS-3-metoden, som är SKB:s huvudalternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle, har genom åren bestått proven i form av bland annat regelbunden myndighetsgranskning och jämförelser med alternativa metoder. Det gäller såväl de avgörande säkerhetsmässiga aspekterna som frågor om teknisk genomförbarhet och resurseffektivitet. SKB:s strategi är därför att optimera och förverkliga en slutförvaring enligt KBS-3-konceptet. Genomförandet ska bygga på beprövad teknik, vilket inte hindrar att tekniska landvinningar under arbetets gång tas tillvara. Utvecklingen vad gäller alternativa koncept och förvaringsmetoder kommer även fortsättningsvis att bevakas och värderas i relation till det egna huvudalternativet.

Kärnbränsleprogrammet ska hantera allt använt bränsle som den svenska kärnenergiproduktionen genererar. Det måste därför kunna anpassas till olika utfall vad gäller återstoden av kärnenergiproduktionen. Det scenario som ligger till grund för SKB:s planering är att de reaktorer som fortfarande är i drift, det vill säga alla utom Barsebäck 1, stängs efter 40 års drift. Detta ger en total bränslemängd på cirka 9 300 ton uran, vilket motsvarar ett djupförvar för cirka 4 500 kapslar av den typ som enligt gällande referensutformning kommer att användas. Programmet medger att såväl mindre som större bränslemängder hanteras, i huvudsak utan andra konsekvenser än att hanteringssystemets totala drifttid, samt utrymmesbehovet i djupförvaret, påverkas.

Loma-programmet

Delar av systemet för hantering av låg- och medelaktivt avfall (Loma) har varit i drift sedan 80-talet, däribland slutförvaringen av olika typer av driftavfall vid SFR i Forsmark. Därmed finns en god kunskapsbas för de steg som återstår att ta, med bland annat utbyggnader vid SFR och som sista steg i processen ett slutförvar för annat långlivat avfall.

Av de avfallstyper som Loma-programmet ska hantera i framtiden utgör avfall från rivningen av kärnkraftverken den volymmässigt dominerande delen. För detta krävs utbyggnader, enligt en tidsplan som kan anpassas till ännu ej fattade beslut som kommer att styra takten på avvecklingen och senare rivningen av kärnkraftverken.

A2 Program för använt kärnbränsle

A2.1 Översikt

Nuläget i kärnbränsleprogrammet kan sammanfattas i följande punkter:

- Utvecklingen av den förvaringsmetod som är SKB:s huvudalternativ befinner sig i ett skede där tester och demonstrationer av systemdelar i pilot- och fullskala är huvudinslag. Kapsel- och Äspölaboratorierna är de centrala resurserna för detta. I många fall kräver verksamheten tillgång till resurser och försöksmiljöer som bara de egna laboratorierna kan erbjuda.
- En inkapslingsanläggning, lokaliserad vid Clab, planeras. Projektering av anläggningen pågår, samtidigt som utvecklingen av inkapslingstekniken drivs vidare. Som alternativ kommer en förläggning vid ett djupförvar i Forsmark att belysas.

- För lokaliseringen av djupförvaret undersöks två kandidatplatser, Forsmark i Östhammars kommun och Simpevarp/Laxemar i Oskarshamns kommun. Dessa prioriterades efter en beslutsprocess baserad på ett brett underlag från översikts- och förstudier. Avsikten är att i ett senare skede välja den ena av kandidatplatserna som förläggingsplats för djupförvaret.
- Det underlag för lokaliseringen av djupförvaret som nu finns innefattar även andra platser som kvarstår som möjliga alternativ, för det fall att undersökningarna av kandidatplatserna inte ger tillfredsställande resultat. Vidare finns ett omfattande jämförelsematerial att tillgå från de typområdesundersökningar som tidigare gjorts på ett tiotal platser i olika delar av landet, liksom från undersökningar inom det finska kärnavfallsprogrammet.
- Både inkapslingsanläggningen och djupförvaret kräver tillstånd enligt miljöbalken och kärntekniklagen. Lagstadgade samrådsförfaranden för detta har inletts, och de kommande beslutsprocesserna är väl definierade.

Med detta som grund har SKB uppdaterat handlingsplanerna för återstoden av programmet. Huvudmålet är att kunna ta hela systemet, inklusive de återstående anläggningarna, i drift. Det mera näraliggande målet är att få de tillstånd som behövs för att etablera inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

Tidsperspektiv 2017

Den aktuella tidsplanen för de båda återstående kärntekniska anläggningarna i programmet, fram till att driften av hela systemet inleds, visas i figur 2. Planen har reviderats något, jämfört med den som redovisades i Fud-program 2001. Den visar den bästa uppskattning SKB kan göra i dagsläget. En given grundförutsättning för genomförandet är att det breda politiska stöd som SKB menar att djupförvarsprogrammet har i dag består.

Hanteringssystemet, inklusive en första etapp av djupförvaret, beräknas kunna tas i drift år 2017. Den inledande driftfasen omfattar 200–400 kapslar, och är avsedd att fungera som en slutprovning och demonstration av metoden. Den inledande driften kommer att pågå några år och utvärderas innan beslut tas om fortsatt, reguljär drift av systemet. Om utvärderingen ger stöd för övergång till reguljär drift så kan denna påbörjas utan längre uppehåll. Hur länge den reguljära driften sedan behöver pågå är direkt beroende av kärnkraftverkens drifttider. SKB:s planeringsförutsättning är att alla reaktorer utom Barsebäck 1 (avstängd november 1999) drivs i 40 år. Med en deponeringstakt på i genomsnitt cirka 160 kapslar per år skulle det innebära att driften av djupförvaret avslutas en bit in på 2050-talet och att hela programmet kan vara avslutat omkring år 2060. Kapacitetskravet för djupförvarssystemet vid full drift är satt till 200 kapslar per år.

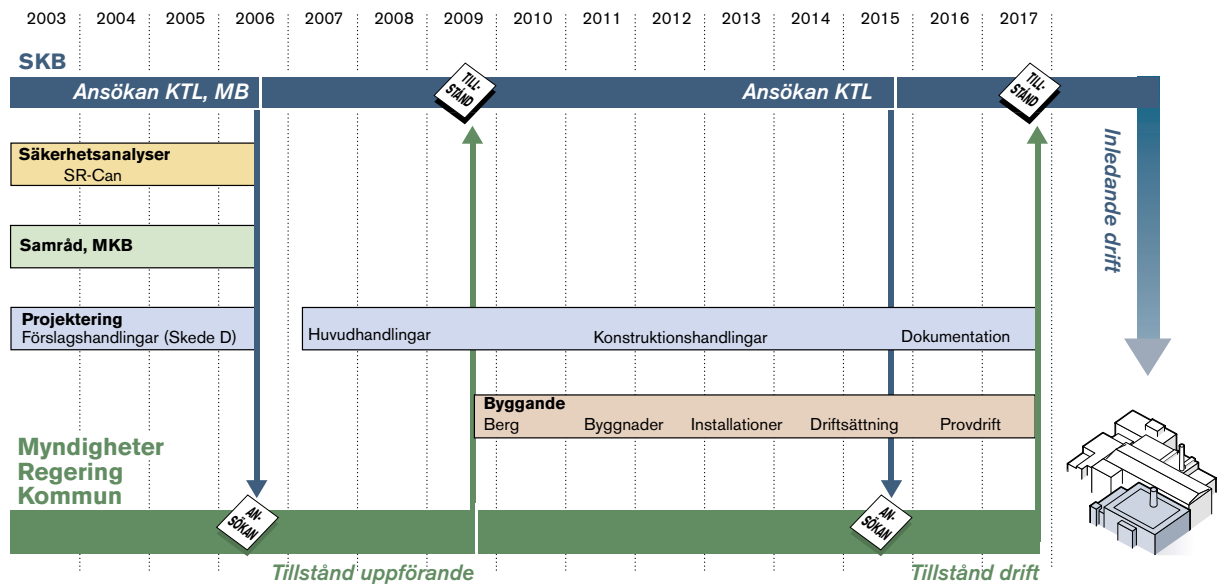
Mellanlagringen av använt kärnbränsle i Clab omfattade vid årsskiftet 2003–2004 drygt 4 000 ton. Den utbyggnad av Clab som gjorts tas enligt planerna i drift under hösten 2004. De utrymmen som därmed finns tillgängliga för mellanlagring bedöms vara tillräckliga för hela kärnbränsleprogrammets behov, under förutsättning att systemet för inkapsling och djupförvaring blir tillgängligt enligt tidsplanen i figur 2. Skulle detta försenas kan en ytterligare utbyggnad av Clab bli nödvändig.

Tidsperspektiv 2008

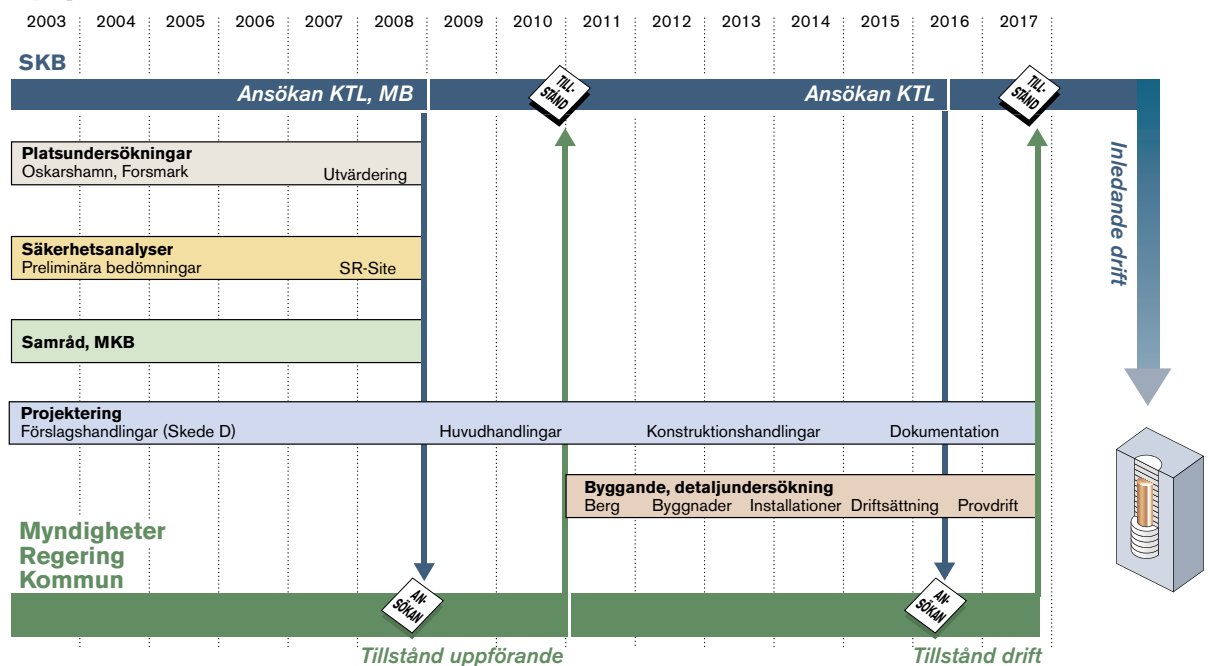
För perioden fram till slutet av år 2008 är målet att kunna lämna in tillståndsansökningar för systemets båda återstående kärntekniska anläggningar. Avgörande förutsättningar för att detta ska kunna realiseras är att:

- Ansökan om att få uppföra en inkapslingsanläggning avser en lokalisering vid Clab. Om läget vid Clab bortfaller som huvudalternativ måste tidsplanen revideras. Andrahandsalternativet är en lokalisering till Forsmark, vilket förutsätter att även djupförvaret förläggs dit.

Inkapslingsanläggning



Djupförvar



Figur 2. Plan för inkapslingsanläggningen och djupförvaret, 2003–2017.

- De platsundersökningar för djupförvaret som inletts kan i huvudsak genomföras inom planerad tidsram (mitten av 2007), och med resultat som motiverar en ansökan att få uppföra djupförvaret på någon av platserna. Ett utfall där lokaliseringsprogrammet istället måste tillföras ytterligare kandidatplatser för djupförvaret innebär revideringar av tidsplanen.
- Utveckling och optimering av tekniken för inkapsling och djupförvaring kan på en rad punkter drivas vidare i ungefär den takt och med de resultat som förutses. Oväntade svårigheter på någon nyckelpunkt kan föranleda förseningar och revideringar.

Att ta fram, sammanställa och redovisa det underlag som krävs för tillståndsansökningarna är en omfattande och för SKB prioriterad verksamhet. Planeringen för detta redovisas närmare i avsnitten A3 och A4. Figur 3 visar schematiskt komponenterna i det underlag som ska tas fram för respektive ansökan och hur underlaget tillförs beslutsprocessen, samt planerade tidpunkter för tillståndsansökningarna. Styrande för SKB:s tidsplan är tidsåtgången för platsundersökningarna och det platsanknutna underlag (anläggningsutformning, säkerhetsanalys, MKB) som bygger på resultaten från dessa. Tillståndsansökan för djupförvaret bedöms med hänsyn till detta kunna finnas framme i slutet av 2008, medan planerad tidpunkt för ansökan för inkapslingsanläggningen är mitten av 2006.

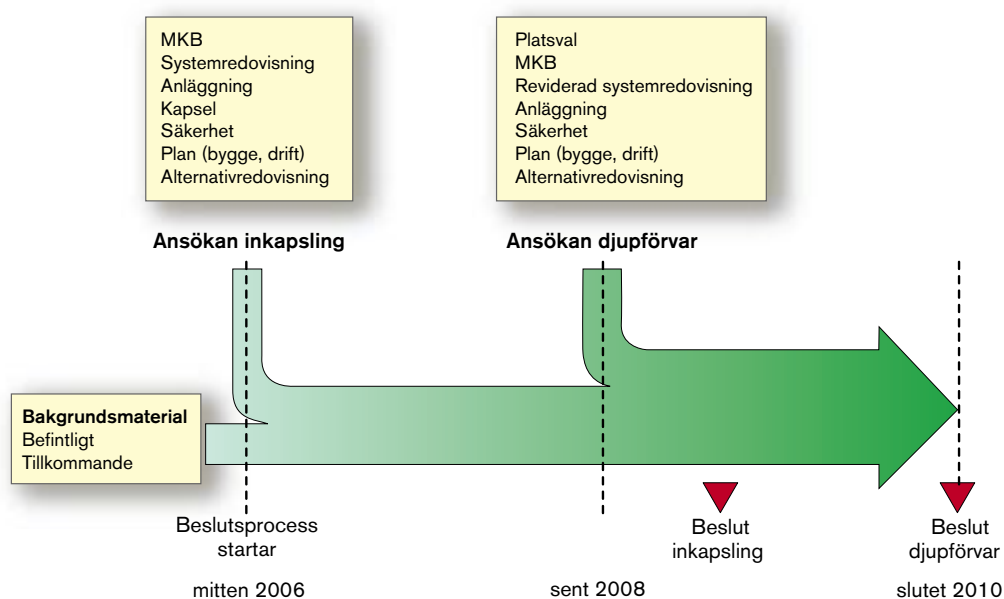
Tidsåtgången för den prövning av ansökningarna som sedan följer påverkas av flera faktorer:

- Kvaliteten på SKB:s underlag.
- Myndigheternas och miljödomstolens resurser och beredskap för att hantera och koordinera ärendena.
- De politiska instansernas beredskap och vilja att fatta de slutliga besluten.

Figur 3 visar vad SKB bedömer vara en rimlig uppläggning och tidsåtgång för prövningsprocessen. Ärendet inleds med SKB:s ansökan om inkapslingsanläggningen i mitten av 2006 och tidsutrymmet för prövningarna bedöms till totalt cirka 4,5 år. Ansökan om inkapslingsanläggningen kommer förutom ingående redovisning av inkapslingstekniken, anläggningen, dess säkerhet och miljökonsekvenser också att innefatta:

- En redovisning av alternativa metoder för att ta hand om använt bränsle.
- En heltäckande systemanalys för inkapsling, transporter och djupförvar.
- En analys av den långsiktiga säkerheten för inkapslat bränsle i ett djupförvar.

Beslutet om inkapslingsanläggningen förutsätts inte kunna fattas förrän en tid (uppskattningsvis nio månader) efter det att ansökan för djupförvaret lämnats in, varvid SKB:s val av plats och fullständiga säkerhetsanalys för denna finns tillgängliga för alla berörda. Prövningen av djupförvarsärendet bör enligt SKB:s uppfattning underlättas väsentligt av att granskningen av inkapslingsanläggningen, som levererar den produkt som ska förvaras i djupförvaret, har kunnat pågå i drygt två år när prövningen av djupförvaret inleds.



Figur 3. Tillståndsansökningar och beslutsprocess för djupförvarssystemet.

Vidare bör noteras att i enlighet med motiveringen till regeringens beslut från november 2001 angående SKB:s samlade redovisning inför platsundersökningsskedet (FUD-K) så utgör KBS-3-metoden en planeringsförutsättning för platsundersökningarna, medan ett slutligt godkännande av en metod för slutförvaring inte görs förrän i samband med ställningstagandet till de kommande tillståndsansökningarna. För att ge nödvändigt underlag för ett sådant ställningstagande avser SKB, som framgår ovan, att i ansökan för inkapslingsanläggningen och tillhörande miljökonsekvensbeskrivning redovisa en genomgång och utvärdering av alternativa metoder för hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle. Detta innebär att myndigheter och regeringen kan ta ställning till SKB:s val av metod i samband med att ansökan för inkapslingsanläggningen prövas.

A2.2 Samråd och miljökonsekvensbeskrivning

Prövning och tillstånd

För djupförvaret och inkapslingsanläggningen krävs i huvudsak tre olika tillstånd:

- Tillstånd enligt miljöbalken.
- Tillstånd enligt kärntekniklagen.
- Bygglov enligt plan- och bygglagen.

Prövningen enligt miljöbalken och kärntekniklagen sker parallellt. I underlaget till respektive ansökan ska det ingå en miljökonsekvensbeskrivning, MKB, som upprättats enligt reglerna i 6 kap miljöbalken. Av miljökonsekvensbeskrivningen ska det bland annat framgå vilka konsekvenser den planerade verksamheten kan ha på människa och miljö, samt hur dessa kan förhindras eller begränsas. Miljökonsekvensbeskrivningens omfattning och avgränsningar tas fram inom ramen för de samrådsprocesser som etablerats.

Samråd

Tidigt samråd ska hållas med länsstyrelsen och med enskilda som kan antas bli särskilt berörda. Tidiga samråd har genomförts för både inkapslingsanläggningen och djupförvaret, både i Oskarshamn och i Forsmark.

Enligt förordningen om miljökonsekvensbeskrivningar (SFS 1998:905) ska en kärnteknisk anläggning alltid antas medföra betydande miljöpåverkan. Detta var också innebörden av de beslut som länsstyrelserna i Kalmar respektive Uppsala fattade efter det att SKB inlämnat samrådsredogörelser från de tidiga samråden. Det innebär att utökad samråd med miljökonsekvensbedömning krävs för både inkapslingsanläggningen och djupförvaret innan respektive ansökan kan inlämnas. Det utökade samrådet ska ske med länsstyrelsen, övriga statliga myndigheter, de kommuner, den allmänhet och de organisationer som kan antas bli berörda. Samrådet ska avse verksamhetens lokalisering, omfattning, utformning och miljöpåverkan samt innehåll och utformning av miljökonsekvensbeskrivningen.

De utökade samråden påbörjades under 2003 och samordnas för inkapslingsanläggningen och djupförvaret på respektive plats. Det utökade samråden kan indelas i tre skeden:

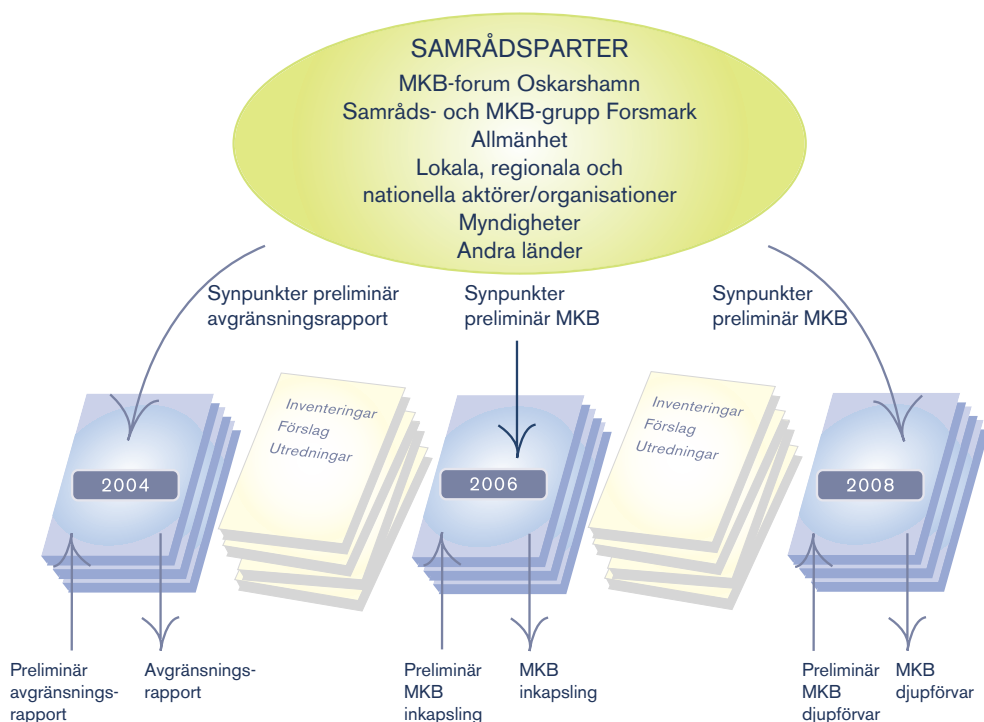
- Omfattning och avgränsning av MKB.
- Utredning.
- Avstämning.

Inledningsvis har de utökade samråden i huvudsak behandlat omfattning och avgränsning av MKB. Preliminära avgränsningsrapporter har tagits fram som diskussionsunderlag. De behandlar vad MKB-arbetet ska omfatta och vilka utredningar som planeras som underlag till MKB-dokumenterna. Synpunkter och förslag som kommer fram beaktas i planeringen av det fortsatta MKB-arbetet. Avsikten är att slutversioner av rapporterna ska tas fram under 2004.

I den efterföljande utredningsfasen kommer resultat från undersökningar och utredningar samt förslag till anläggningsutformning att redovisas vid samrådsmötena, och de medverkande ges möjlighet att lämna synpunkter. Detta skede pågår så länge som undersökningar, anläggningsprojektering och utredningar pågår, det vill säga till slutet av 2005 för inkapslingsanläggningen och till 2008 för djupförvaret. Figur 4 illustrerar interaktionen mellan SKB och övriga parter i samrådsprocesserna.

När erforderliga utredningar är genomförda sammanställs en preliminär miljökonsekvensbeskrivning. Innan tillståndsansökan inlämnas avser SKB att stämma av de huvudsakliga bedömningarna med berörda samrådsparter. Samrådsprocessen avslutas då SKB lämnar in tillståndsansökan med tillhörande MKB-dokument för prövning enligt kärntekniklagen och miljöbalken. Till respektive ansökan kommer en samrådsredogörelse att bifogas. I denna ska det finnas en sammanställning av framförda synpunkter och framgå på vilket sätt synpunkterna har beaktats.

Förutom de formella samråden bedrivs en omfattande informationsverksamhet riktad till bland annat kommunerna, organisationer och allmänhet. Denna verksamhet kommer även fortsättningsvis att pågå parallellt med de lagstadgade samråden.



Figur 4. Interaktion mellan SKB och övriga parter i samrådsprocesserna.

A2.3 Systemutformning

A2.3.1 Grundläggande krav, konstruktionsförutsättningar

Förutsättningarna för konstruktion och utformning av hanteringssystemet för använt kärnbränsle kan på en övergripande nivå härledas till samhällets lagar och föreskrifter, övriga krav på säkerhet samt egna och andras krav på teknisk genomförbarhet och effektivitet. Dessa krav är i regel allmänt formulerade och inte direkt applicerbara för optimering eller mera handfast konstruktionsarbete. Därför måste de omsättas till funktionskrav på systemet eller dess delar.

Funktionskraven omfattar i huvudsak säkerhet och strålskydd, övrigt miljöskydd, byggande och drift samt krav som följer av internationella överenskommelser. Utformningen och utförandet av anläggningarna måste kunna visas uppfylla alla dessa krav, för de påfrestningar som är dimensionerande i olika avseenden. Påfrestningarna fastställs genom att utreda de situationer och processer som inträffar eller kan tänkas inträffa under bygge, drift och för djupförvarets del även efter förslutning. Det gäller exempelvis statiska belastningar, deformationer och rörelser, korrosion etc.

Avfallsprogrammets arbetsordning, med regelbundna redovisningar i form av bland annat Fud-program och säkerhetsanalyser, har inneburit en successiv utveckling av systemet, med fortlöpande avstämning mot kraven. År 2002 lämnade SKB en lägesredovisning av arbetet med att ta fram konstruktionsförutsättningar, se kapitel 5 och 11 med referenser. Redovisningen täcker hela djupförvarssystemet och dess delar, och innefattar också de härledningar i flera led som gjorts för att få fram användbart dimensioneringsunderlag ur övergripande krav. Graden av precisering och kvantifiering som redovisningen ger för de parametrar, laster etc som styr utformning och utförande motsvarar arbetsläget vid redovisningstillfället.

A2.3.2 Systemanalys och optimering

Den övergripande strategin för att utforma och optimera ett förvarssystem enligt KBS-konceptet har redovisats i många sammanhang, senast i Fud-program 2001. Principen är att i definierade steg ta fram en allt mera detaljerad utformning av anläggningarna, erforderlig infrastruktur och tekniska försörjningssystem. På samma sätt preciseras utförandet av byggande och drift. I takt med att utformningen detaljeras görs vägval som krymper alternativbredd och handlingsfrihet, först för övergripande systemval, därefter tekniska lösningar för anläggningar och delsystem, och slutligen detaljerna. Detta arbetssätt har med framgång tillämpats i många industriprojekt, däribland SFR, Clab och kärnkraftverken.

Vägval och prioriteringar under processens gång görs systematiskt genom att ta fram tänkbara alternativ och värdera dessa mot uppställda krav eller andra jämförelsegrunder vad avser:

- Säkerhet och funktion efter förslutning.
- Säkerhet under byggande och drift.
- Miljö.
- Genomförbarhet och effektivitet.
- Resursbehov.

Definitiva val av system- och tekniklösningar ska göras i så sena skeden som möjligt för att till fullo ta tillvara den tekniska utvecklingen och i vissa fall även platsspecifikt underlag. Dock får inte besluten skjutas så långt fram i tiden att utvecklingen av andra delar i systemet hämmas eller grundas på alltför oklara förutsättningar. Avvägningen mellan å ena sida fördelarna med att bibehålla handlingsfrihet och å andra sidan kravet att i rimlig takt driva utformningen mot slutmålet är en stående och central punkt i SKB:s strategiska planering.

Den systemövergripande optimeringen hanteras inom ramen för begreppet systemanalys. Systemanalysens syfte är att utvärdera hur alternativa sätt att utforma, bygga och driva en anläggning eller systemdel påverkar andra anläggningar eller delar och hela systemet. Därmed möjliggör systemanalysen även den nödvändiga överblicken över hur olika beslut och vägval påverkar frihetsgraderna i hela systemet.

Även effekterna av störningar och missöden analyseras. Den bas varifrån konsekvenserna av variationer, störningar eller missöden mäts och värderas är gällande referensutformning och tidsplan. Resultaten från systemanalysen är centrala för att kunna välja utformningsalternativ och motivera dessa val.

Detaljeringsnivån i systemanalysen begränsas på så sätt att endast variationer och störningar i en anläggning eller systemdel som har effekter på någon annan anläggning eller systemdel studeras. Frågor där alternativ, val av lösningar, störningar etc bara berör enskilda anläggningar hanteras däremot som komponenter i projekteringen av respektive anläggning. Med denna avgränsning är exempelvis djupförvarets kapacitet att ta emot kapslar för deponering en fråga för systemanalysen, medan sättet att transportera ner kapslarna i förvaret inte är det.

Viktiga systemvarianter som kommer att behandlas i kommande systemanalyser är:

- Lokaliseringsalternativ för djupförvaret (Forsmark eller Simpevarp/Laxemar).
- Lokalisering av inkapslingsanläggningen (referens vid Clab, alternativ Forsmark).
- Total bränslemängd (referens 40 års drift av kärnkraftverken, alternativ 60 års drift).
- Deponeringsmetod (referens KBS-3V, alternativ KBS-3H).
- Återtag (referens inget återtag, alternativ återtag efter inledande drift).
- Förslutning (referens förslutning kort efter avslutad drift, alternativ längre period med öppet förvar).

Exempel på störningsmoment som kommer att analyseras är driftstopp i olika led av hanteringskedjan. Studerade varianter och störningar utvärderas med avseende på de ovan nämnda, allmängiltiga jämförelsegrunderna. Andra jämförelsefaktorer kan tillkomma, exempelvis systemets tillgänglighet samt safeguards och fysiskt skydd. Kostnadsaspekterna för olika varianter av systemutformning och genomförande studeras inom ramen för det löpande Planarbetet, och ingår därför inte i systemanalysen.

Mellan programmen för använt kärnbränsle respektive Loma finns vissa ömsesidiga systemberoenden. Systemanalyserna för kärnbränslesystemet kommer därför att belysa även de konsekvenser som utformningsvarianter får för Loma-systemet.

Redovisning inför tillståndsansökningar

I samband med den samlade redovisningen av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet (FUD-K) presenterade SKB en systemredovisning avseende KBS-3-metoden samt en konsekvensutredning av nollalternativet, definierat som fortsatt lagring i Clab.

Under återstoden av platsundersökningsskedet planeras redovisningar av reviderade systemanalyser vid två tillfällen. Den första, benämnd Sysinka, kommer att ingå i underlaget för tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. Vid sidan av Clab och inkapslingsanläggningen redovisas då det underlag som finns framme beträffande djupförvaret. Den andra systemanalysen, benämnd Sysdjup, biläggs på motsvarande sätt ansökan för djupförvaret, varvid det kompletta systemet med valda lokaliseringar redovisas.

Systemanalyserna kommer i stor utsträckning att bygga på annat underlag som tas fram och dokumenteras inför ansökningarna. De viktigaste är:

- Systembeskrivningar.
- Anläggningsbeskrivningar.
- Preliminära säkerhetsredovisningar (PSR) för anläggningarna.
- Alternativutredningar avseende tekniska lösningar för inkapsling, transporter och djupförvaring.
- Säkerhetsanalyser.

Genomförandet av systemanalyserna, i första hand Sysinka, har planerats i detalj och arbetet har startat. Initieringen har genomförts i dialog med myndigheterna, inom ramen för den samrådsprocess som finns etablerad.

A2.3.3 Långsiktig säkerhet

Det yttersta syftet med stora delar av genomförandeprogrammet för använt kärnbränsle är att åstadkomma ett säkert förvar för använt kärnbränsle. Sedan utvecklingsarbetet med KBS-konceptet startade i slutet av 1970-talet har SKB etablerat en rad principer som tillsammans kan sägas utgöra den säkerhetsfilosofi som ligger till grund för att uppnå detta syfte. Dessa principer sammanfattas nedan, i enlighet med de önskemål som uttryckts från myndigheterna i samband med granskningen av Fud-program 2001. Vidare sammanfattas planerna för redovisning av säkerhetsanalyser i samband ansökningarna för inkapslingsanläggningen och djupförvaret. Metodiken för SKB:s säkerhetsanalyser, ur ett mer tekniskt perspektiv, behandlas i kapitel 14.

Principer för säkerhet

Använt kärnbränsle är farligt under mycket långa tider. En första princip är därför att finna en långsiktigt stabil miljö för ett förvar. Naturliga variationer i klimatet gör att vi kan förvänta oss dramatiska förändringar med permafrost och inlandsisar i Sverige inom tidsrymder av storleken tusentals år. Samhället förändras i betydligt snabbare takt. Genomgripande och oförutsägbara förändringar är inte uteslutna ens i jämförelsevis mycket korta tidsperspektiv. Även mänskligt orsakade klimatförändringar kan göra sig gällande betydligt tidigare än de naturligt förväntade variationerna. Överväganden som dessa har lett till att geologiska miljöer på hundratals meters djup setts som de mest realistiska för ett förvar. De geologiska förutsättningarna i Sverige har lett till valet av granitiskt urberg som den lämpligaste geologiska miljön.

Förvaret ska förläggas till en plats där berggrunden kan antas vara ekonomiskt ointressant för framtida generationer. Den ska till exempel inte innehålla mineral som kan tänkas bli av intresse i framtiden.

En annan princip är att omge det använda bränslet med flera skyddsbarriärer. Principerna för barriärernas funktion är att i första hand isolera bränslet och, om isoleringen skulle skadas, att i andra hand fördröja spridningen av ett eventuellt utsläpp av radionuklider. Bränslet placeras i korrosionsbeständiga kopparkapslar med en gjutjärnsinsats som ger kapslarna mekanisk hållfasthet. Kopparkapslarna omges av en buffert av bentonitlera i deponeringshål på cirka 500 meters djup i urberget. Bentonitleran skyddar kapslarna från mindre bergörelser och bromsar tillträdet av de korroderande ämnen som finns i låga halter i grundvattnet. Berget i sig utgör en långsiktigt mekaniskt och kemiskt stabil miljö för kapslar och bentonitlera. Kapslarna är därför en isolerande barriär med mycket lång livslängd i den miljö buffert och berg erbjuder.

Såväl bränslet som kapsel, buffert och berg bidrar till att fördröja en eventuell spridning av radionuklider om en kapsel skulle skadas. Bränslet i sig är mycket stabilt i den miljö som råder på hundratals meters djup i urberget. Många av de farligaste radionukliderna har så låg löslighet i grundvatten att de därigenom hålls otillgängliga för vidare spridning. Såväl kopparkapseln som gjutjärnsinsatsen försvårar, även om de skulle skadas, inläckage av grundvatten och spridning av radionuklider. Bufferten bromsar både inläckage av vatten till en skadad kapsel och spridning av radionuklider. Grundvattnet rör sig långsamt i bergets spricksystem och många radionuklider har dessutom en stark tendens att fastna på sprickytor i berget.

Materialen för kapsel och buffert har valts bland annat utifrån principen att de ska vara naturligt förekommande och stabila i en miljö som liknar den i djup svensk berggrund. Den buffertlera som SKB vill använda i djupförvaret bildades för omkring 100 miljoner år sedan och låg därefter kvar i en miljö som liknar svenskt grundvatten under cirka 50 miljoner år. Ädelmetallen koppar är långsiktigt stabil i den kemiska miljö vi har i vårt djupa grundvatten.

Använt kärnbränsle avger strålning som omvandlas till värme i ett förvar. Temperaturer över cirka 100 °C kan orsaka förändringar i kapsel och buffert för vilka det kan vara svårt att förutsäga de långsiktiga konsekvenserna. Därför utformas förvaret för att undvika höga temperaturer. Detta åstadkoms genom att mellanlagra bränslet i Clab under 30–40 år för att strålintensiteten ska avta, genom att begränsa mängden bränsle i varje kapsel och genom att inte placera kapslarna för tätt i förvaret.

Systemet av barriärer ska också vara passivt, det vill säga det ska fungera i sitt naturliga tillstånd utan ingripande från människa och utan tillförsel av energi eller material.

I sammanfattning är principerna bakom SKB:s säkerhetsfilosofi följande:

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

Redovisning inför tillståndsansökningar

De två ansökningar som förutses enligt figur 3 fordrar var sin analys och redovisning av den långsiktiga säkerheten för djupförvarssystemet. För ansökan för djupförvaret är kravet på en säkerhetsanalys uppenbart. Även ansökan för inkapslingsanläggningen kommer att kräva en redovisning av säkerheten, eftersom det i ansökan måste visas att ett djupförvar med de förslutna kapslar som ska levereras från inkapslingsanläggningen uppfyller de krav på långsiktig säkerhet som ställts upp av svenska myndigheter.

TVå säkerhetsrapporter kommer därför att tas fram, en för respektive ansökan. I figur 2 och fortsättningsvis benämns rapporterna SR-Can respektive SR-Site (efter engelskans canister – kapsel, respektive site – plats). Inriktningen för dessa redovisningar och planeringen av arbetet med att ta fram dem har diskuterats med myndigheterna vid ett antal samrådstillfällen. Avsikten är att SR-Can ska baseras på platsdata från de pågående inledande platsundersökningarna, medan SR-Site ska bygga på data från de kompletta platsundersökningarna.

Huvudsyftet med SR-Can är att bedöma säkerheten för ett KBS-3-förvar vid de platser som nu undersöks, och med kapslar enligt ansökan för inkapslingsanläggningen. Ett annat syfte är att ge återkoppling till vidare kapselutveckling, utformningen av djupförvaret, samt till kommande säkerhetsanalyser och SKB:s program för forskning om frågor av betydelse för långsiktig säkerhet.

Ett planeringsdokument för SR-Can redovisades av SKB under 2003. Där skisserades även en preliminär metodik för analysen. Vidare har inriktning och planering för SR-Can diskuterats med myndigheterna vid olika samrådstillfällen. Nyligen har en interimsrapport från arbetet redovisats, med huvudsyftet att presentera och demonstrera den använda metodiken, inklusive de uppdateringar som gjorts med ledning av myndigheternas synpunkter från granskningen av SR 97. Interimsrapporten kommer genom myndigheternas försorg att genomgå en ingående expertgranskning. SKB kommer att nyttja utfallet av denna granskning inför slutförandet av SR-Can och senare för SR-Site.

Under 2004 planeras även redovisningar av de preliminära säkerhetsbedömningar som görs av de platser där platsundersökningar pågår (se avsnitt A4.5). Huvudsyftena med dessa är att avgöra om tidigare bedömningar av platsens lämplighet med avseende på den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar kvarstår i ljuset av borrhålsdata, samt att ge återkoppling till den fortsatta undersökningsverksamheten och projekteringen av platsanpassade förvarslösningar.

Säkerhetsanalysen SR-Site kommer att bygga på data från de kompletta platsundersökningarna. Huvuddelen av metodiken och redovisningsstrukturen för SR-Can kommer att användas också i SR-Site. Vissa delanalyser kan också komma att redovisas som referenser till SR-Can, medan de flesta delanalyser som bygger på platsdata kommer att behöva upprepas med de mer utvecklade modeller av platserna som tas fram under platsundersökningarnas senare del. I den mån synpunkter från myndigheternas granskning av SR-Can finns tillgängliga kommer dessa att beaktas vid utformningen av SR-Site.

A2.3.4 Alternativet horisontell deponering, KBS-3H

KBS-3 innebär i sin grundversion att kapslar deponeras i hål, cirka 1,8 meter i diameter, som borrar vertikalt nedåt från tunnlarna. Referensutformningen är att en kapsel deponeras i varje hål, som då behöver göras cirka åtta meter djupt. Alternativa varianter, med flera kapslar i samma hål och/eller deponering i horisontella hål eller tunnlarna, har studerats genom åren. Jämförande analyser har resulterat i att referensutformningen med vertikal deponering bibehållits.

Horisontell deponering bedöms inte ge några fördelar relativt referensutformningen för det fall att en kapsel deponeras i varje hål. Ett alternativ kan emellertid vara att göra avsevärt längre horisontella hål (storleksordning 100–300 meter) så att många kapslar kan deponeras i rad. Detta förutsätter att kapsel och omgivande bentonit kan deponeras som en enhet omgiven av ett perforerat stålhölje. Denna variant har i tidigare sammanhang benämnts MLH (MedelLånga Hål) men benämns fortsättningsvis KBS-3H (Horisontellt).

En utformning enligt KBS-3H kan ge fördelar från miljö- och kostnadssynpunkt. Skälet är att de långa hålen fyller den dubbla funktionen av deponeringstunnlar och deponeringshål, eller annorlunda uttryckt att behovet av deponeringstunnlar bortfaller. Därmed reduceras både den totala bergvolym som behöver tas ut och de tunnelvolymerna som behöver återfyllas. Tekniken för att borra de långa, grova hål som skulle behövas har på senare år utvecklats avsevärt. Om en sådan utformning kan visas vara jämbördig med referensalternativet vertikal deponering med avseende på teknisk genomförbarhet i övrigt och säkerhet kan KBS-3H därför erbjuda intressanta optimeringsmöjligheter.

Mot den bakgrunden har SKB beslutat att vidareutveckla horisontell deponering i hål med längder i storleksordningen några hundra meter. Ett stegvis upplagt utvecklingsprogram har utarbetats, och arbetet inleddes under 2002. Avsikten är att driva utvecklingsarbetet så långt att KBS-3H antingen kan läggas åt sidan, eller kan ersätta den nuvarande referensutformningen.

Mycket av den kunskap som behövs för att värdera KBS-3H kan hämtas direkt från utvecklingsarbetet för vertikal deponering. Förvarets anläggningar ovan jord, nedfarter och centralområde påverkas inte alls eller marginellt av hur deponeringen genomförs. Detsamma gäller deponeringstätheten och därmed förvarets yttre dimensioner, under förutsättning att kraven på berget är jämförbara. Inkapslingstekniken och kapseldimensionerna är inte annorlunda än för referensutformningen. Den generella kunskapen om berggrunden är tillämpbar och de platsundersökningar som nu genomförs bedöms ge det underlag som behövs om berget på plats, oavsett vilket deponeringsalternativ (-3V eller -3H) som väljs. Buffertmaterialets egenskaper och funktion är ytterligare områden där befintliga FoU-resultat till stor del är tillämpbara även för KBS-3H.

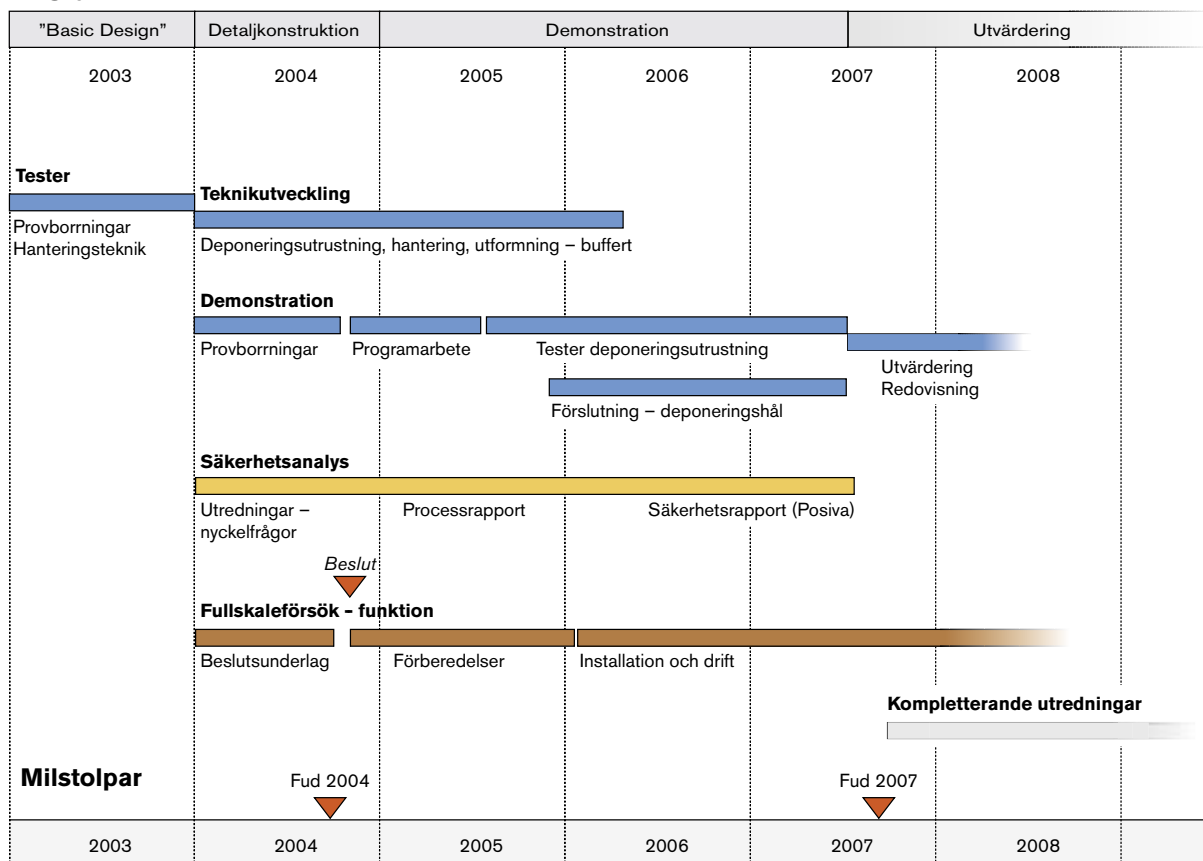
Det finns emellertid också frågor där dagens kunskap inte är direkt tillämpbar för KBS-3H och som kräver omfattande utvecklingsarbete med storskalig provning och demonstration. Det tar därför tid innan en helhetsvärdering av metoden kan göras. Nyckelfrågor som SKB identifierat när det gäller den tekniska genomförbarheten av KBS-3H är:

- Borrning av deponeringshål (utrustning och genomförande).
- Behov av och teknik för tätning och bergstabilisering i deponeringshål.
- Tillverkning av deponeringsenheterna.
- Deponeringsutrustning och deponeringssekvens.
- Buffertmaterialets funktion (utveckling under den inledande vattenmättnadsfasen efter deponering).
- Förvarsalternativets möjlighet att uppfylla kraven på långsiktig säkerhet.
- Möjligheter till återtag.

SKB:s utvecklingsprogram fokuserar på dessa frågor, se figur 5. Under 2002 och 2003 har en förstudie och den första av tre huvudetapper ("basic design") genomförts i samarbete med Posiva. Resultaten av de tekniska utredningar och praktiska försök som genomförts har motiverat den mera omfattande etapp som nu pågår. Den omfattar förutom utredningar av tekniska nyckelfaktorer och förberedelser för en säkerhetsanalys även demonstrationsförsök i full skala vid Äspölaboratoriet. Borrning av två hål planeras och en deponeringsutrustning ska konstrueras, byggas och testas. Det första målet är att demonstrera att metoden går att genomföra praktiskt. Om så är fallet är tanken att etablera ett fullskaligt funktionstest, med preliminär starttidpunkt i början av 2006. Säkerhetsanalysen genomförs av Posiva, preliminärt under 2006.

Om planerna enligt figur 5 kan genomföras enligt tidsplan och med tydliga resultat blir Fud-program 2007 en lämplig tidpunkt för en sammanfattande lägesredovisning av KBS-3H. Då är teknikutvecklingen och demonstrationsfasen avslutad och säkerhetsanalysen genomförd. Vad som däremot kan saknas är fullständiga data från det fullskaleförsök som planeras vara etablerat men befinner sig på ett relativt tidigt stadium. Vidare kan man erfarenhetsmässigt anta att de delar av utvecklingsprogrammet som då genomförts väckt frågor som kräver ytterligare insatser.

KBS-3H



Figur 5. Plan för utveckling av KBS-3H.

Inför tillståndsansökan för djupförvaret, enligt tidsplanen år 2008, finns det troligen ett omfattande underlag om KBS-3H med avseende på teknisk genomförbarhet, miljöaspekter, kostnader med mera. Därmed kan också de potentiella fördelarna från miljö- och kostnadssynpunkt värderas relativt fullständigt. Det är däremot inte troligt att KBS-3H vid den tidpunkten har nått den utvecklingsmässiga mognad som krävs för ett eventuellt beslut att införa denna variant som referensutformning. Den bedömning som SKB gör i dag är att ett sådant vägval bör ses på längre sikt. Det skulle innebära att SKB i samband med ansökan (som alltså avser vertikal deponering) beskriver utvecklingsläget för KBS-3H, liksom möjligheterna, och konsekvenserna av, att byta deponeringsmetod i senare skeden.

För att motivera en övergång till KBS-3H i ett senare skede är kravet att metoden kan visas vara jämbördig med referensutformningen med avseende på långsiktig säkerhet, samt ge tydliga fördelar ur andra aspekter. Om utvecklingsarbetet leder till den slutsatsen borde hanteringsgången vara att SKB anmäler ett anläggningsändringsärende som prövas av myndigheten (SKI).

En viktig fråga är vilken flexibilitet i utformning av djupförvaret som återstår i olika skeden, i relation vad som är rimligt att uppnå när det gäller beslutsunderlag om KBS-3H. SKB:s bedömning är att en övergång till horisontell deponering är möjlig även i ett skede när djupförvaret börjat byggas, eftersom valet av deponeringsalternativ har liten inverkan på de delar som anläggs tidigt, det vill säga ovanjordsanläggningar, nedfarter och centralområde under jord. Detta ger ett tidsperspektiv som utifrån dagens kunskap är rimligt för att driva utvecklingen av KBS-3H så långt att en helhetsvärdering står på stabil grund.

A3 Inkapsling

A3.1 Översikt

Utvecklingen av tekniken för inkapsling befinner sig i ett intensivt skede. Arbetet fokuseras nu på underlag för tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. Efter att tillstånd beviljats följer byggnation, driftsättning och provdrift. Tillstånd för drift av inkapslingsanläggningen bör enligt SKB:s tidsplan kunna finnas år 2017.

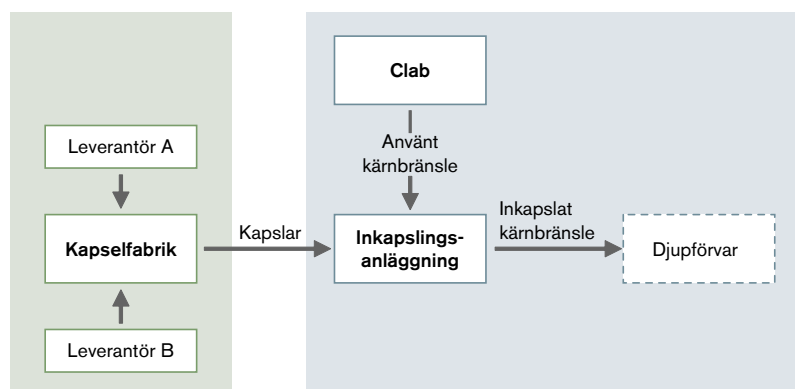
De grundläggande kraven på inkapslingen är att de kapslar som deponeras ska vara täta, långsiktigt motståndskraftiga mot korrosion i den miljö som djupförvaret ger samt tåla de belastningar som förutses efter deponering. De ska funktionsmässigt vara opåverkade av hanteringskedjan från förslutning till deponering. Arbetet med att ur dessa grundkrav härleda kvantitativa krav som bland annat specificerar materialkvalitet och dimensioner, liksom toleranser vid tillverkning och förslutning, har pågått under lång tid.

Figur 6 visar förenklat flödet i inkapslingsprocessen. För tillverkningen av kapselns komponenter finns olika metoder. SKB har i samarbete med leverantörer vidareutvecklat och provat flera metoder, även i full skala. Detta arbete kommer att drivas vidare för att få fram en färdig tillverkningsprocess i industriell skala.

En nyckelkomponent i produktionsprocessen är förslutningen som sker efter det att bränsleelement placerats i kapseln. Förslutningen görs genom att svetsa ett kopparlock på det kopparrör som utgör kapselns yttermantel. För att kunna svetsa med hög tillförlitlighet i aktuella material och godstjocklekar krävs ett omfattande utvecklingsarbete. SKB utvecklar två metoder – EBW (electron beam welding – elektronstrålesvetsning) och FSW (friction stir welding – friktions-svetsning).

Parallellt med utvecklingen av tillverknings- och förslutningsmetoder utvecklas tekniker för kvalitetskontroll med hjälp av oförstörande provning. För att säkerställa att kvalitetsmålen uppnås tas ett system för kvalitetssäkring fram. Systemet anger vilka krav som ställs och hur dessa ska uppfyllas och dokumenteras. Det omfattar bland annat rutiner och kvalitetsplaner samt krav på testmetoder och tillhörande acceptanskriterier. Metoder och leverantörer för tillverkning, förslutning och kontroll kommer att kvalificeras, och en dialog pågår med SKI angående formerna för detta.

Även om utvecklingen av produktionsprocessen drivs med målet att uppnå mycket hög tillförlitlighet måste risken för att enstaka kapslar som inte uppfyller specifikationerna trots allt produceras och passerar kontrollsystemet beaktas. Denna risk måste kunna kvantifieras och beaktas i säkerhetsanalyserna. Kvantifieringen kommer att baseras på testproduktion och statistisk utvärdering av den resulterande kvaliteten. Risken för att en kapsel inte uppfyller specifikationerna är beroende av tillförlitligheten hos både svetsprocessen och kvalitetskontrollsystemet.

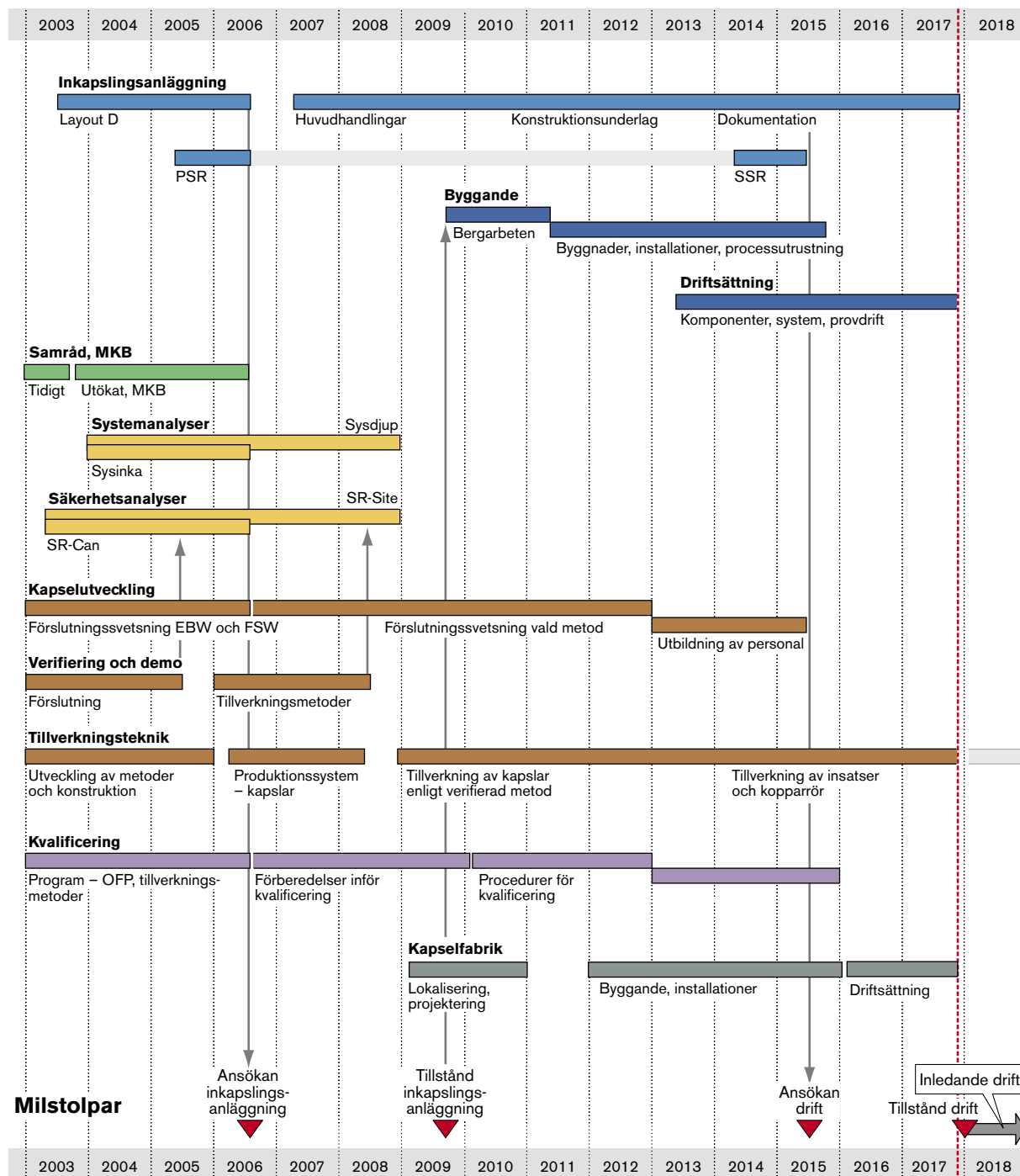


Figur 6. Översikt över produktionsprocessen.

Tidsperspektiv 2017

Det nuvarande skedet i genomförandet av inkapslingen domineras av utveckling och utprovning av teknik och processer som successivt övergår i fastställda system och procedurer som kvalificeras. I tidsperspektivet fram till 2017 kommer programmet även att genomgå skeden av projekteringsarbete, byggande och driftsättning, för att 2017 vara klart för en driftfas. Figur 7 visar en genomförandeplan för inkapslingen, fram till driftstart.

Inkapsling



Figur 7. Plan för inkapsling, 2003–2018.

De övergripande milstolparna är:

- Att ansöka om tillstånd för lokalisering och uppförande av inkapslingsanläggningen.
- Att beviljas tillstånd för lokalisering och uppförande.
- Att ansöka om tillstånd för drift av inkapslingsanläggningen.
- Att beviljas tillstånd för drift.

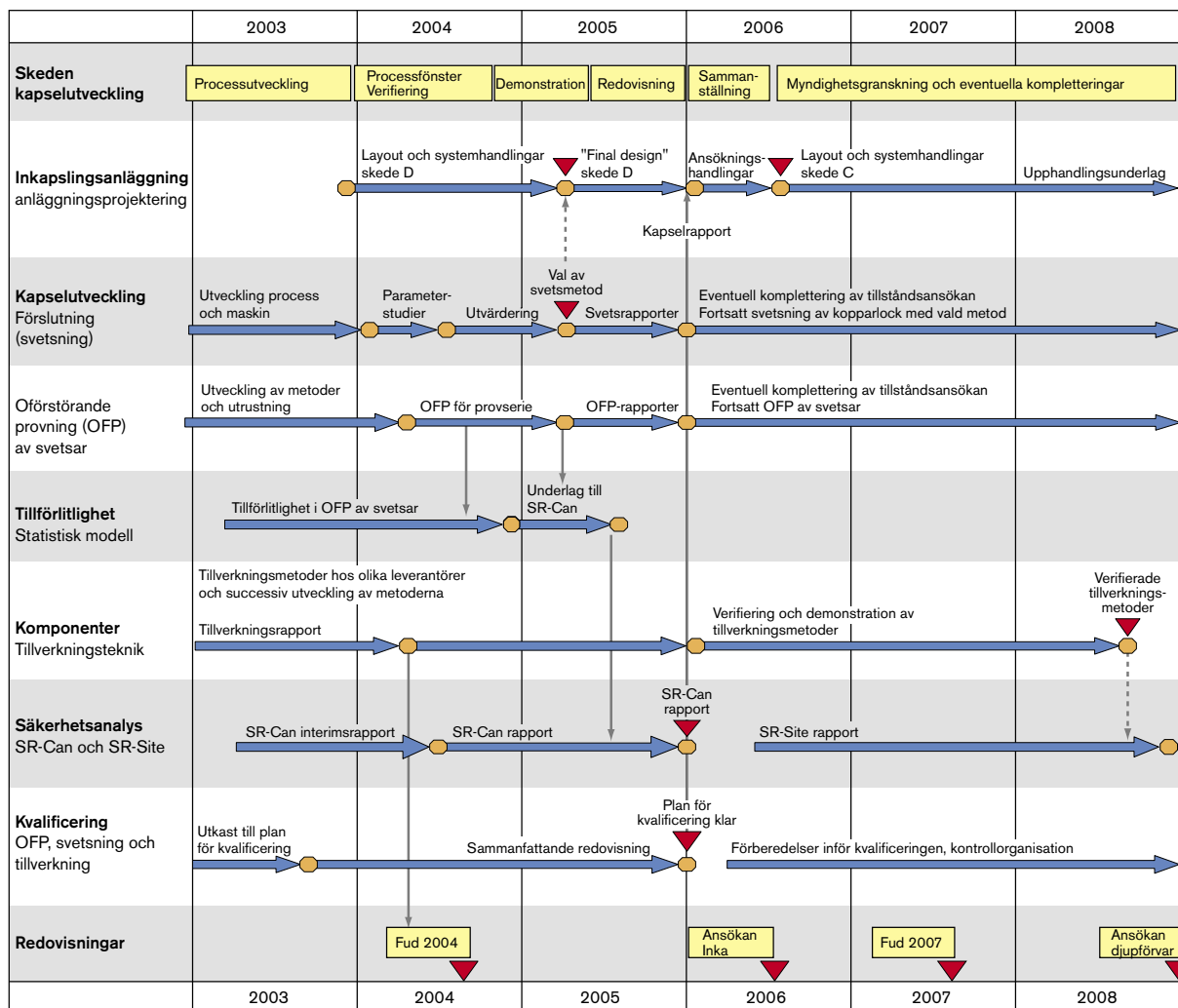
När beslut fattats om lokaliseringen av inkapslingsanläggningen vidtar detaljprojektering, byggande, installationsarbeten och driftsättning. Under driftsättningsperioden avser SKB att ansöka om tillstånd för drift av inkapslingsanläggningen.

Tidsperspektiv 2008

Under de närmaste åren fokuseras arbetet på att ta fram underlag för ansökan om tillstånd för lokalisering och uppförande av inkapslingsanläggningen, sammanställa denna ansökan och lämna in den till myndigheterna – enligt planeringen i mitten av 2006. Ansökan kommer att gälla en lokalisering i anslutning till Clab. Alternativ lokalisering är Forsmark. En förutsättning för att det ska bli aktuellt att lokalisera inkapslingsanläggningen till Forsmark är att även djupförvaret förläggs dit, men även i det fallet utgör lokaliseringen av inkapslingsanläggningen vid Clab SKB:s huvudalternativ.

För att ansökan ska kunna lämnas in måste utvecklingsarbetet ha kommit så långt att inkapslingen kan visas vara genomförbar på ett säkert och rimligt effektivt sätt. Figur 8 visar genomförandeplanen för att åstadkomma detta, och indikerar även inbördes kopplingar mellan aktiviteter samt viktiga redovisningstillfällen. Med tillägg för verksamhet, utöver det tekniska utvecklingsarbetet, som krävs innan en tillståndsansökan kan lämnas in är huvudaktiviteterna under perioden följande:

- Fastställa acceptanskriterier för kapselkomponenter och förslutningssvetsar.
- Vidareutveckla svetsmetoder för förslutning av kapslar och välja huvudalternativ.
- Vidareutveckla och verifiera metoder för oförstörande provning av tillverkning och förslutning av kapslar.
- Ta fram en plan för kvalificering.
- Tillverka och försluta kopparkapslar i en omfattning och med en kvalitet som kan ligga till grund för den säkerhetsanalys som ska åtfölja ansökan.
- Ta fram en reviderad systemanalys, där bland annat redovisningen av alternativa metoder för omhändertagande av använt kärnbränsle ges stort utrymme.
- Ta fram en säkerhetsanalys (SR-Can) inklusive revideringar av metodik och med beaktande av nytt underlag från utvecklingsarbetet avseende inkapsling.
- Projektera en inkapslingsanläggning vid Clab, till en nivå som ger underlag för den anläggningsbeskrivning som ska ingå i ansökan.
- Ta fram underlag avseende en inkapslingsanläggning vid Forsmark, till en nivå som möjliggör en jämförelse, enligt miljöbalkens krav, med den sökta lokaliseringen i anslutning till Clab.
- Genomföra lagstadgade samråd.
- Ta fram en miljökonsekvensbeskrivning.
- Sammanställa ansökan.



Figur 8. Plan för inkapsling, 2003–2008.

Under åren 2006–2008 förväntas huvudinriktningen bli att stödja den inlämnade ansökan med de förtydliganden och eventuella kompletteringar som myndigheterna kan komma att efterfråga, att fortsätta arbetet med projektering och teknikutveckling samt att anpassa inkapslingsprocessen till resurseffektiv produktion. I samband med tillståndsansökan för djupförvaret planeras en lägesredovisning avseende inkapsling.

En beviljad ansökan innebär att platsen för inkapslingsanläggningen och huvuddragen i dess utformning läggs fast. När det gäller teknisk optimering på detaljnivå och anpassning av processen för resurseffektiv produktion kommer stora frihetsgrader att kvarstå även efter ett lokaliseringsbeslut. Ett exempel är serietillverkningen av kapselkomponenter och sammansättningen av dessa. Hur detta ska organiseras och var det ska ske är frågor som avgörs i senare skeden.

A3.2 Anläggningsprojektering

A3.2.1 Inkapslingsanläggningen

Redan i Fud-program 92 angav SKB en förläggning intill Clab som huvudalternativ för lokalisering av inkapslingsanläggningen. Under åren 1994–1996 gjordes en planering och förprojektering av anläggningen för denna lokalisering. Den fortsatta planeringen har delvis avvaktat resultatet av lokaliseringsarbetet för djupförvaret. I och med starten av platsundersökningarna kunde dock projekteringen av en inkapslingsanläggning vid Clab återupptas, som en del av arbetet med att ta fram underlag för en tillståndsansökan, se kapitel 8.

Fördelarna med ett läge i direkt anslutning till Clab är flera, bland annat att den erfarenhet av bränslehantering som finns på Clab kan tas tillvara och att flera av de befintliga systemen och anläggningsdelarna i Clab kan nyttjas. Som alternativ kommer en förläggning vid ett djupförvar i Forsmark att belysas.

Utvecklingsläget och planeringen vad gäller förslutningsteknik för kapseln visar att beslut om svetsmetod troligen kan fattas tidigast i början av 2005. Valet påverkar utformningen av inkapslingsanläggningen. Tills vidare kommer därför anläggningen att projekteras för båda metoderna. Projekteringen av inkapslingsanläggningen kommer att drivas vidare, efter det att ansökan lämnats in.

A3.2.2 Kapseltillverkning

Kapacitet för seriemässig produktion av kapslar bör finnas ungefär ett år innan inkapslingsanläggningen tas i drift, det vill säga cirka 2016. Huvuddelen av underlaget för de avgörande besluten om var kapseltillverkningen förläggs tas enligt nuvarande planering fram om 5–6 år, det vill säga efter ansökan för inkapslingsanläggningen. Visst underlag om den planerade kapselfabriken kommer dock att bifogas ansökan för inkapslingsanläggningen, däribland en teknisk beskrivning. Lokaliseringsarbetet förväntas dock inte vara påbörjat vid tiden för ansökan.

A3.3 Kapselutveckling

A3.3.1 Förslutning

SKB arbetar för närvarande med två alternativa metoder för förslutning av kapseln, EBW (elektronstrålesvetsning) och FSW (friction stir welding). En utförlig redovisning av metoderna och utvecklingsarbetet ges i kapitel 6. Fullskaliga utrustningar för båda finns vid Kapsellaboratoriet. I början av år 2005 är avsikten att besluta vilken metod som ska utgöra huvudalternativ i ansökan. Bedömningen i dag är att det är fullt möjligt att lyckas med båda metoderna.

Utvecklingen av svetsmetoderna sker vid Kapsellaboratoriet med stöd av TWI (The Welding Institute) i Storbritannien. Huvudskedena i arbetet är:

- Processutveckling.
- Processverifiering.
- Demonstration.
- Redovisning/rapportering.
- Sammanställning.

De viktigaste stegen i processutvecklingen har tagits för båda svetsmetoderna. Arbetet har inneburit att förståelse för svetsprocesserna byggts upp, anpassningar och förbättringar av utrustningar, samt studier av hur enskilda parametrar styr och påverkar svetsresultatet.

I det efterföljande skedet, verifiering, studeras inom vilka intervall svetsparametrarna måste ligga för att få önskad kvalitet på svetsen. Intervallen ska vara tillräckligt stora för att inte små oförutsedda eller normala förändringar i svetsparametrar, utrustning eller omgivande miljö skall påverka svetskvaliteten. Detta skede avslutas under 2004.

Därefter följer demonstration av svetsmetoderna, i en sådan omfattning att resultaten kan utgöra indata till säkerhetsanalysen SR-Can. Resultat och erfarenheter redovisas och rapporteras. Under denna fas studeras även möjligheterna att driva processen under förhållanden som motsvarar serieproduktion.

Vid kapsellaboratoriet drivs även utvecklingsarbetet för oförstörande provning (OFP) av kapselns förslutningssvets. För kapslar förslutna med EBW har procedurer för provning tagits fram, för FSW pågår motsvarande arbete. För att bestämma tillförlitligheten vid OFP pågår ett utvecklingsarbete vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) för att kvantifiera risken för att en kapselsvets som inte uppfyller acceptanskriterierna ska undgå att detekteras.

Underlaget för valet av svetsmetod kommer att innefatta bland annat erfarenheter från utvecklingsarbetet, utvärdering av svetsmetodernas robusthet, data om uppnådd kvalitet vid seriesvetsning, samt förväntad kassationsfrekvens i produktion. Om det av något skäl inte är lämpligt att välja huvudmetod vid den planerade tidpunkten (2005) kan valet senareläggas. Om båda svetsmetoderna bedöms lämpliga vid ansökningstillfället är en möjlighet att i ansökan specificera den ena metoden, men driva utvecklingsarbetet vidare för båda. Slutgiltigt val kan då göras senare, under förutsättning att inkapslingsanläggningens utformning hålls öppen för båda alternativen.

A3.3.2 Kapselkomponenter

Utvecklingen av tillverkningstekniker för de i kapseln ingående komponenterna, det vill säga gjutjärnsinsats, stållock till insatsen, kopparrör, kopparlock och botten har pågått under ett antal år. Arbetet har huvudsakligen bedrivits hos leverantörer inom och utom landet, med stöd från branschföreningar, universitet och forskningsinstitut, se kapitel 5.

För tillverkningen av kopparrör har fyra metoder provats. Utvecklingsläget för metoderna är varierande, men samtliga bedöms ha potential att uppfylla kvalitetskraven. För att säkerställa framtida leveranser och bibehålla leverantörskonkurrens är inriktningen att fortsätta den parallella utvecklingen av olika metoder. Ambitionen är att även den framtida serietillverkningen ska engagera flera leverantörer och eventuellt även olika metoder.

Utvecklingen av tillverkningsteknik för kapselns segjärnsinsats görs med olika gjutmetoder hos olika leverantörer. Liksom för kopparrören är inriktningen att den framtida serietillverkningen av insatser ska engagera flera leverantörer och metoder.

Ett stort antal lock och botten i koppar har tillverkats genom smide. Denna del av tillverkningskedjan fungerar mycket bra och komponenterna uppfyller de ställda kvalitetskraven. Arbetet med kapselns lock och botten har alltså kommit långt. I referensutformningen är kopparrörets vägg tjocklek 5 centimeter. Tunnare kopparhölje har diskuterats. Valet av kopparrörets vägg tjocklek är en optimeringsfråga med avseende på bland annat säkerhet på kort och lång sikt, teknik, miljö och resurseffektivitet. Prov med att svetsa fast botten på kopparhöljet har tidigare utförts med EBW vid TWI och helt nyligen med FSW vid Kapsellaboratoriet. En svetsmetod som uppfyller kvalitetskraven för locksvetsning är även applicerbar på botten. Jämfört med locksvetsen är botten svetsning enklare att utföra och kontrollera då den utförs i ett tidigare tillverkningskede utan vare sig kapselinsats eller bränsle. Om kopparröret tillverkas med dornpressning kan botten svetsning komma att utgå.

Utvecklingsarbetet för oförstörande provning (OFP) för kapselns komponenter utgår dels från de olika leverantörernas provningsverksamhet, dels från den erfarenhet som byggs upp vid Kapsellaboratoriet. Utrustningar, metoder och kompetens har inventerats. Hittills har arbetet fokuserat på kopparhöljet och insatsen. Ännu sker ingen OFP på vissa detaljer som kopparlock/botten, kanalarör och stållock med tillhörande bult. Arbete planeras för att klargöra vilken typ av provning som krävs samt utveckla och applicera eventuell metodik. För kapselns kopparkomponenter och insatsdetaljer är avsikten att färdigställa utredningar och specifikationer under 2004. Under 2005 ska godkända OFP-resurser för provning av de viktigaste kapselkomponenterna finnas att tillgå.

Under 2004 är inriktningen att ta fram beskrivningar av de defekter som kan uppstå i olika skeden i produktionssystemet. Utgående från dessa beskrivningar, tillförlitlighetsstudierna för OFP, samt probabilistisk hållfasthetsanalys av insatsen upprättas 2005 preliminära acceptanskriterier för kapseln (kopparhölje och insats). Kriterierna anger gränser för defekter vid olika tillverkningsprocesser och den inverkan dessa får ha på kapselns egenskaper. Vidare kvantifieras provningsmetodernas förmåga att detektera dessa defekter.

Komponenttillverkningen inriktas på att fram till 2006 tillverka ett tillräckligt antal kapselkomponenter med en referensmetod under seriemässiga former och bekräfta att dessa komponenter uppfyller fastställda kvalitetskrav för att verifiera tillförlitliga konstruktioner och tillverkningsmetoder. Detta mål uppnås genom tillverkningsprov hos en leverantör och successiv utveckling av tillverkningsmetoderna baserad på utvärdering av uppnådd kvalitet.

Utvecklingen av övriga tillverkningsmetoder kommer att fortgå. Kvalificering av dessa metoder avses göras så sent som möjligt för att upprätthålla flexibiliteten och ta tillvara teknisk utveckling.

A3.3.3 Tillverkning

Tillverkningen av komponenterna till kapslarna kommer att ske hos olika leverantörer, på den svenska eller internationella marknaden. SKB behöver dock ha strikt kontroll över de kapselkomponenter som går in till inkapslingsanläggningen. Därför planeras slutjustering av kapselkomponenterna och hopsättning ske i egen regi, möjligen i samarbete med SKB:s finska motsvarighet Posiva. En fabrik för dessa ändamål kan liknas med en kvalificerad mekanisk verkstad. Några bränsleelement kommer aldrig att finnas i anläggningen. Lokaliseringsarbetet för kapseltillverkningen har som nämnts inte påbörjats.

A3.4 Säkerhetsanalys

Planeringen för säkerhetsanalyser under platsundersökningsskedet i sin helhet redovisas i avsnitt A2.3.3. Ansökan för inkapslingsanläggningen kommer att baseras på säkerhetsanalysen SR-Can. Den nyligen publicerade interimsrapporten från arbetet med SR-Can redovisar genomförd metodutveckling, liksom planer för att lösa de metodikfrågor som återstår innan projektet slutredovisas.

Målet för SR-Can är att visa att kapslar – förslutna och provade med den teknik som utvecklas, prioriteras och demonstreras inför ansökan – kan ge ett förvar som uppfyller säkerhetskraven, givet den förvarsmiljö som kandidatplatserna erbjuder. Experimentella data från framför allt demonstrationsfasen av arbetet med förslutning och provning blir därför en viktig del av indata till SR-Can.

Platsdata från de inledande platsundersökningarna kommer att användas i SR-Can. Kopplingarna mellan de olika stegen i undersökningarna, projekteringen av djupförvaret och underlaget för SR-Can redovisas i figur 10.

Arbetet med kapselutveckling kommer att fortsätta även efter att ansökan för inkapslingsanläggningen lämnats in. När SR-Site tas fram inför ansökan för djupförvaret kommer nyvunnen kunskap om inkapslingen att beaktas. Till denna ansökan avser SKB att visa att även tillverkningen av kapslar, det vill säga de arbetsmoment som utförs utanför inkapslingsanläggningen, behärskas seriemässigt. Det inkluderar hela tillverkningskedjan, inklusive tillhörande oförstörande provning (OFP). I samband med denna redovisning är det väsentligt att ett rimligt antal kapslar, där det enda som saknas är bränslet, har tillverkats.

A3.5 Kvalificering

Kvalificering innebär en undersökning av att ett tillverknings- eller kontrollförfarande uppfyller ställda krav. Det kvalitetssystem som SKB utarbetar innehåller kvalificeringskrav på såväl processer som leverantörer av kapselkomponenter, se kapitel 7. SKB har i utredningar kommit fram till att de föreskrifter som gäller för kvalificering för tillverkning, installation, reparation samt återkommande kontroll enligt SKIFS 2000:2 inte är tillämpliga för kapseln. Detta har också bekräftats av SKI. Inte heller den kontrollordning, ackrediterat laboratorium, ackrediterat kontrollorgan och godkänt kvalificeringsorgan, som gäller för kärnkraftsektorn är i nuläget applicerbar för kapseln. En av anledningarna till detta är att kvalificeringen skall gälla för kapselns integritet i ett långsiktigt tidsperspektiv. Den kvalificeringsordning som gäller för tillverkning, installation och reparation beaktar inte detta. Återkommande kontroll kommer heller inte att komma i fråga för kapseln. För SKB:s del innebär detta att en metod för kvalificering, kvalificeringsordning och kontrollordning måste utarbetas och presenteras för myndigheten.

Kvalificering av produktionsprocessen omfattar de olika delprocesserna tillverkning, svetsning och OFP. Sannolikt kommer vissa kvalificeringar att kunna utföras av SKB i enlighet med kvalitetssystemets nuvarande krav, medan vissa kommer att omfattas av tillkommande myndighetskrav. En viktig del av arbetet under de närmaste åren är således att klargöra detta.

Det bör betonas att det omfattande arbete som SKB bedriver inom forskning och teknisk utveckling går hand i hand med kvalificeringsarbetet. Kvalificeringsarbetet handlar i hög grad om att strukturera och sammanställa befintlig och nytillkommande information på ett logiskt sätt.

En viktig milstolpe för kvalificeringsarbetet passeras då SKB ansöker om tillstånd för inkapslingsanläggningen. I detta skede är arbetet inriktat mot att bestämma preliminära detekteringsmål, att demonstrera tillförlitligheten hos OFP av förslutningssvetsen, samt att via säkerhetsanalysen SR-Can studera effekterna på den totala säkerheten i djupförvaret. SKB kommer även att ta ett samlat grepp avseende underliggande teknisk dokumentation som har relevans för kravbilderna på OFP. Principer för teknisk dokumentation av inkapslings- och tillverkningsprocessen kommer att redovisas. Detta arbete är ett led i en långsiktig plan för kvalificering som successivt utarbetas i dialog med SKI och som kommer bifogas ansökan.

A4 Djupförvaring

A4.1 Översikt

Tidsperspektiv 2023

Figur 9 visar den genomförandeplan för djupförvarsprojektet som SKB arbetar efter, fram till att djupförvaret kan tas in i reguljär drift. Figuren indikerar även nyckelkomponenterna i den parallellt pågående teknikutvecklingen och de viktigaste storskaliga försöken vid Äspölaboratoriet, med kopplingar till genomförandeplanen.

De övergripande milstolparna är:

- Att ansöka om tillstånd för uppförande av djupförvaret på vald plats.
- Att beviljas tillstånd för uppförande av djupförvaret på denna plats.
- Att ansöka om tillstånd för drift av djupförvaret.
- Att beviljas tillstånd för drift.
- Att efter en period av inledande drift kunna övergå i reguljär drift.

Tidsperspektiv 2008

Figur 10 visar mera detaljerat planen för perioden 2003–2008, det vill säga återstoden av lokaliseringsfasen för djupförvaret, fram till planerad tidpunkt för ansökan. Förutom platsundersökningarna redovisar figuren planerna för projekteringen och säkerhetsanalyserna av djupförvaret, samt viktiga kopplingar mellan dessa verksamheter. Motsvarande plan för det parallella, tekniska utvecklingsarbetet för djupförvarsprojektets behov redovisas i avsnitt A4.4, figur 12.

Platsundersökningsskedet är verksamhetsmässigt inriktat på att ta fram det underlag som behövs för en hållbar tillståndsansökan. Huvudaktiviteterna är följande:

Platsundersökningar

- Genomföra påbörjade undersökningar i Forsmark.
- Genomföra påbörjade undersökningar i Oskarshamn.
- Ta fram beskrivningar av de undersökta platserna, som grund för platsanpassade djupförvarslösningar, säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar.

Projektering

- Projektera anläggningar, system och infrastruktur för djupförvar på de undersökta platserna, till en nivå som ger underlag för de anläggningsbeskrivningar och säkerhetsanalyser som ska ingå i ansökan.

Säkerhetsanalys

- Ta fram säkerhetsanalyser avseende djupförvaring på de undersökta platserna.

Samråd och miljökonsekvensbeskrivning

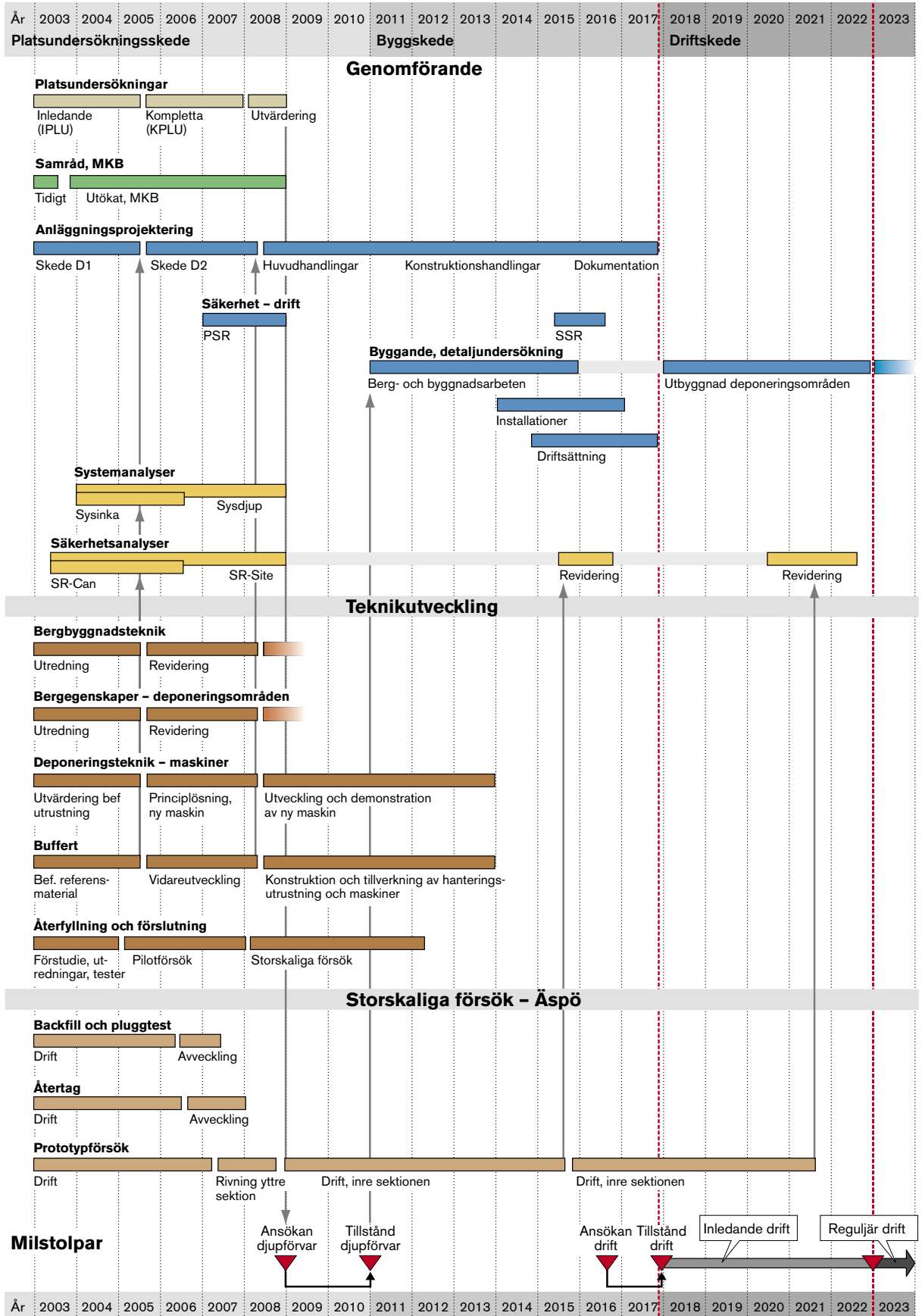
- Genomföra lagstadgade samråd och övrig kommunikation med berörda parter och allmänhet.
- Ta fram den miljökonsekvensbeskrivning som ska åtfölja ansökan.

I avsnitt A4.2–A4.6 redovisas dessa huvudaktiviteter mera fullständigt.

I slutfasen av platsundersökningsskedet görs en samlad utvärdering av allt underlag för att kunna:

- Prioritera en plats för djupförvaret och motivera denna prioritering.
- Sammanställa tillståndsansökan.

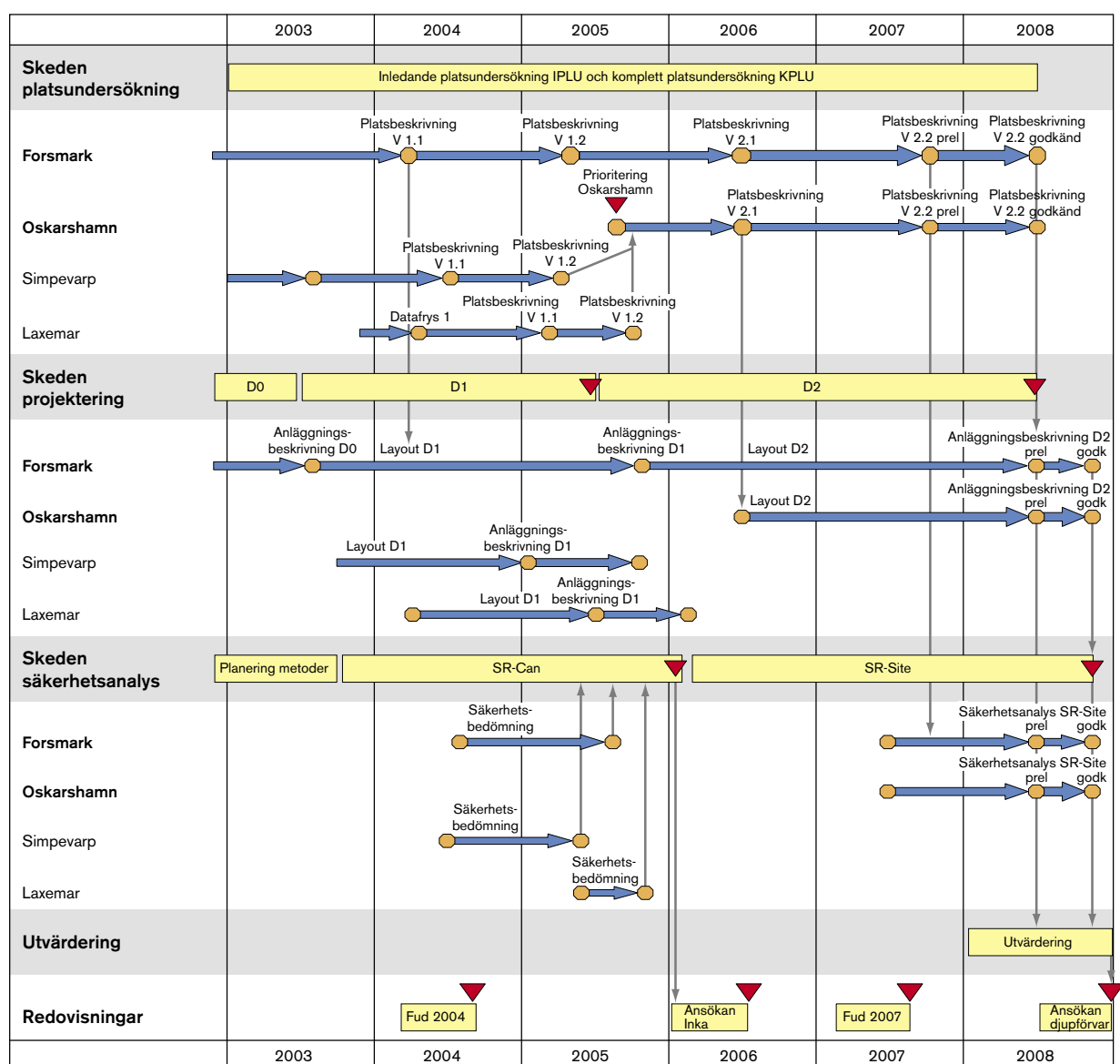
Djupförvar



Figur 9. Plan för djupförvaret, 2003–2023.

Som framgår av figur 10 är arbetet under platsundersökningsskedet iterativt upplagt. Den nu pågående etappen benämns inledande platsundersökning och beräknas vara slutförd under våren 2005. Målet är i detta skede att verifiera den bedömning som motiverade valen av kandidatplatser, det vill säga att dessa har goda förutsättningar att uppfylla kraven för ett djupförvar. Insamlade data om förhållandena på plats ställs mot i förväg uppställda kriterier. Vidare studeras hur ett djupförvar skulle kunna utformas med hänsyn till lokala förutsättningar och preliminära bedömningar görs av säkerheten för ett sådant förvar.

Under förutsättning att resultaten bekräftar lokaliseringsalternativet som fortsatt intressant genomförs den andra etappen av planen (benämnd komplett platsundersökning). Då är syftet att ta fram underlag till en nivå som medger en ansökan.



Figur 10. Huvudaktiviteter under platsundersökningsskedet och inbördes kopplingar mellan dessa.

A4.2 Platsundersökningar

Platsundersökningar genomförs nu i två kommuner, Oskarshamn och Östhammar. Arbetet är indelat i två etapper, inledande och komplett platsundersökning. Efter den inledande etappen görs en utvärdering som bland annat innefattar en preliminär säkerhetsbedömning där en avstämning görs mot de krav som ställts på berget. Om det visar sig att någon plats inte fyller kraven så kan platsundersökningen avbrytas i detta skede. SKB:s planeringsförutsättning är emellertid att platsundersökningarna slutförs i båda kommunerna.

A4.2.1 Forsmark

Platsundersökningen i Forsmark avser ett cirka 10 km² stort område som sträcker åt sydost från kärnkraftverket, ner mot Kallrigafjärden. Området sammanfaller till stora delar med utbredningen av en så kallad tektonisk lins, som är en förhållandevis väl bevarad urbergsenhet, omgiven av zoner med starkt deformerad berggrund. Huvudargumenten för valet av området var att berggrunden bedömdes som gynnsam, samt det från etableringssynpunkt fördelaktiga läget i anslutning till industriområdet, SFR och hamnen. Området ligger i en kustmiljö med höga naturvärden, vilket ställer särskilda krav på såväl platsundersökningen som utvecklingen av en djupförvarslösning på platsen.

Platsundersökningen inleddes vid årsskiftet 2001–2002. Organisation och verksamhet byggdes upp och nådde full omfattning under det första verksamhetsåret. Nuläget i genomförandet kan sammanfattas:

- Karakteriseringen av områdets geologiska och ekologiska förhållanden på ytan är till stora delar genomförd.
- Fem djupa kärnborrhål (1 000 meter) och ett flertal grundare hammarborrhål (max cirka 200 meter) har färdigställts för att undersöka berggrunden.
- En heltäckande, preliminär platsbeskrivning (version 1.1) har redovisats.
- Samrådsprocessen för ett eventuellt djupförvar i Forsmark har etablerats.
- En aktiv informations- och kommunikationsverksamhet har etablerats för fortlöpande dialog med närboende, allmänheten, kommunen och andra lokala intressenter.

De data som analyserats hittills har motiverat att undersökningarna fokuseras till områdets nordvästra del. Någon tillförlitlig prognos för slutresultatet går ännu inte att ge, bland annat återstår det att göra den preliminära säkerhetsbedömning som baseras på data efter den inledande undersökningsetappen. I nuläget finns det dock inget som tyder på annat än att platsundersökningen i Forsmark kommer att fullföljas, och att detta kan göras enligt tidsplanen i figur 10.

Innan platsundersökningen inleddes identifierades ett antal platsspecifika, geovetenskapliga frågor som bedömdes särskilt viktiga att besvara för att kunna avgöra platsens förutsättningar från förvarssynpunkt. Tabell 1 sammanfattar nuläget i förståelsen för dessa nyckelfrågor.

Förutom frågor som är specifika för platsen finns det en mängd faktorer som generellt är viktiga att klargöra. Det gäller bland annat förekomst och frekvens av bergartsgångar och sprickzoner, vattenföringen i dessa och mellanliggande berggrund, samt vattenkemiska och termiska förhållanden. I fallet Forsmark är den generella bilden att berggrunden nära ytan kännetecknas av väntat hög vattenföring i distinkta strukturer. Detta i kontrast till förhållandena på större djup, som präglas av homogen, sprickfattig berggrund och väntat låg vattenföring. Vad gäller vattenkemiska och termiska förhållanden har undersökningarna inte visat på några överraskningar, vilket indikerar gynnsamma förhållanden på förvarsdjup.

Tabell 1. Nuläge för platsspecifika nyckelfrågor som identifierades inför starten av platsundersökningen i Forsmark.

| Nyckelfråga | Status |
|--|---|
| Den tektoniska linsens utsträckning och form mot djupet. | Flera borrhål har verifierat ett djupgående överstigande 1000 meter. Den förmodade branta stupningen av linsens randzoner har verifierats för vissa avsnitt, för andra återstår undersökningar innan frågan kan besvaras. |
| Eventuell malmpotential mot djupet. | Frågan har särskilt studerats i samband med de borrhågar som gjorts. Inga spår efter mineraliseringar och/eller malmpotentiell berggrund har kunnat detekteras inom linsen. Frågan torde därför kunna avföras. |
| Förekomst av flacka sprickzoner. | Ner till ungefär 200 meters djup är starkt vattenförande, flacka sprickor och sprickzoner vanligt förekommande. På större djup har endast ett fåtal flacka sprickzoner påträffats. |
| Eventuell förekomst av höga bergspänningar. | De mätningar som gjorts hittills har visat på relativt höga, men inte extrema, bergspänningar. Ytterligare mätningar planeras för att få den erforderliga helhetsbilden. |

A4.2.2 Oskarshamn

Huvudargumentet för en platsundersökning i Simpevarpsområdet nära Oskarshamn var kombinationen av berggrund som bedömdes gynnsam, och det etableringsmässiga fördelarna som Simpevarp erbjuder, i form av industrimark och infrastruktur, närheten till Clab och Äspölaboratoriet, och kopplingen till den planerade inkapslingsanläggningen. Platsundersökningen startade i och med att kommunfullmäktige i mars 2002 fattade beslut om att låta SKB inleda platsundersökningen. Samrådsprocessen med kommunen och dess arbetsgrupper hade då redan inletts och är i dag väl etablerad.

Undersökningarna inriktades mot två delområden; Simpevarpshalvön med omnejd samt Laxemarområdet väster därom. Dessa områden har olika geologiska förutsättningar och undersökningarna bygger på delvis olika systemlösningar för ett eventuellt förvar. En förläggning till Simpevarpshalvön skulle innebära att även anläggningarna ovan mark förläggs dit. En förläggning till Laxemarområdet kan innebära antingen att vissa anläggningsdelar ovan mark placeras på Simpevarp (med tunnelförbindelse till förvaret) eller att hela anläggningen placeras på Laxemar.

För Simpevarpshalvöns berggrund fanns frågetecken i form av bland annat en relativt hög frekvens av sprickor och därmed en osäkerhet beträffande det tillgängliga utrymmet för ett djupförvar. Givet de fördelar som platsen skulle ge ur andra aspekter bedömdes en undersökning ändå väl motiverad. Undersökningarna på och kring halvön startade direkt efter kommunbeslutet, och nuläget är sammanfattningsvis följande:

- En detaljerad geologisk kartläggning har utförts.
- Tre djupa kärnborrhål (1 000 meter) har färdigställts på Simpevarpshalvön.
- Undersökningsområdet har utvidgats till att även innefatta Ävrö, Hålö och kringliggande vattenområden.
- Ett nytt kärnborrhål har färdigställts på Ävrö och ett befintligt har gjorts tillgängligt för mätningar.

Resultaten från borrhågen på Simpevarpshalvön visade till stora delar på goda mekaniska och hydrauliska förhållanden, trots en komplex blandning av olika bergarter. Med dessa resultat som grund fanns det anledning att utvidga området på det sätt som gjorts, eftersom Simpevarpshalvön i sig bedöms ge ett för begränsat utrymme för att ta fram en tillräckligt flexibel djupförvarslösning.

Mot väster från Simpevarpshalvön konstaterades redan i förstudien stora områden som ur geovetenskaplig synvinkel motiverade vidare undersökningar. Här inleddes platsundersökningen med geofysiska flygmätningar och andra studier som underlag för att prioritera ett område för borringar. En analys visade ett antal områden med vad som kunde bedömas som likvärdiga geologiska förutsättningar. Med det utgångsläget prioriterades Laxemarområdet, omedelbart väster om Simpevarp, på grund av områdets närhet till befintliga anläggningar på Simpevarpshalvön. I enlighet med principen att djupförvarsprojektet ska drivas på frivillighetens grund inledde SKB förhandlingar om tillträde för undersökningar i området med de många markägare som skulle beröras. Förhandlingarna drog ut på tiden, men kunde i huvudsak slutföras till årsskiftet 2003–2004. Därmed kunde arbetet starta, knappt ett år försenat jämfört med den ursprungliga planeringen.

Inriktningen att fullfölja den pågående etappen av platsundersökningen för båda alternativen Simpevarp och Laxemar kvarstår. Därefter görs en utvärdering, med stöd av det underlag som tagits fram. Om inte utvärderingen föranleder annat är tanken att sedan fullfölja platsundersökningen för ett av alternativen, se figur 10. Om Simpevarpsalternativet då prioriteras kan undersökningarna koncentreras dit. Väljs istället Laxemarområdet görs ytterligare undersökningar där, och förutsättningarna för en tunnelförbindelse från Simpevarp utreds.

Förutom den inbördes prioriteringen mellan de två delområdena identifierades även i fallet Oskarshamn ett antal platsspecifika, geovetenskapliga frågor som bedömdes särskilt viktiga att få svar på. Tabell 2 sammanfattar nuläget för dessa, främst med avseende på Simpevarpsdelen eftersom det är där som nya borrhålsdata finns tillgängliga.

Tabell 2. Nuläge för platsspecifika nyckelfrågor som identifierades inför starten av platsundersökningen i Oskarshamn.

| Nyckelfråga | Status |
|--|--|
| Storlek och läge av berggrundsblock med gynnsamma egenskaper på förvarsdjup. | Borringar i kombination med lineamenttolkningar visar att delområdet Simpevarp troligen omgärdas av deformationszoner av sådan dignitet att de utgör gränser för ett eventuellt förvarsområde. Inom området finns lineament som kan tolkas som zoner av lägre dignitet. Uppspruckna partier i borrhålen uppvisar med något undantag relativt låg vattenföring. |
| Förekomst och betydelse av gångar av finkornig granit samt sprickzoner, särskilt med avseende på vattengenomsläpplighet. | Analyser av data från stora områden vid och väster om Simpevarp visar att finkornig granit förekommer jämt fördelat. De gångar av finkornig granit som påträffats i borrhålen på Simpevarpshalvön har inte uppvisat någon förhöjd vattengenomsläpplighet, jämfört med omgivande berg. |

A4.3 Anläggningsprojektering

Projektering är samlingsbegreppet för den verksamhet där krav och förutsättningar, tekniska lösningar och annat underlag samlas in och bearbetas för att så småningom kunna omsättas till anläggnings- och funktionsbeskrivningar, konstruktionsritningar och bygghandlingar.

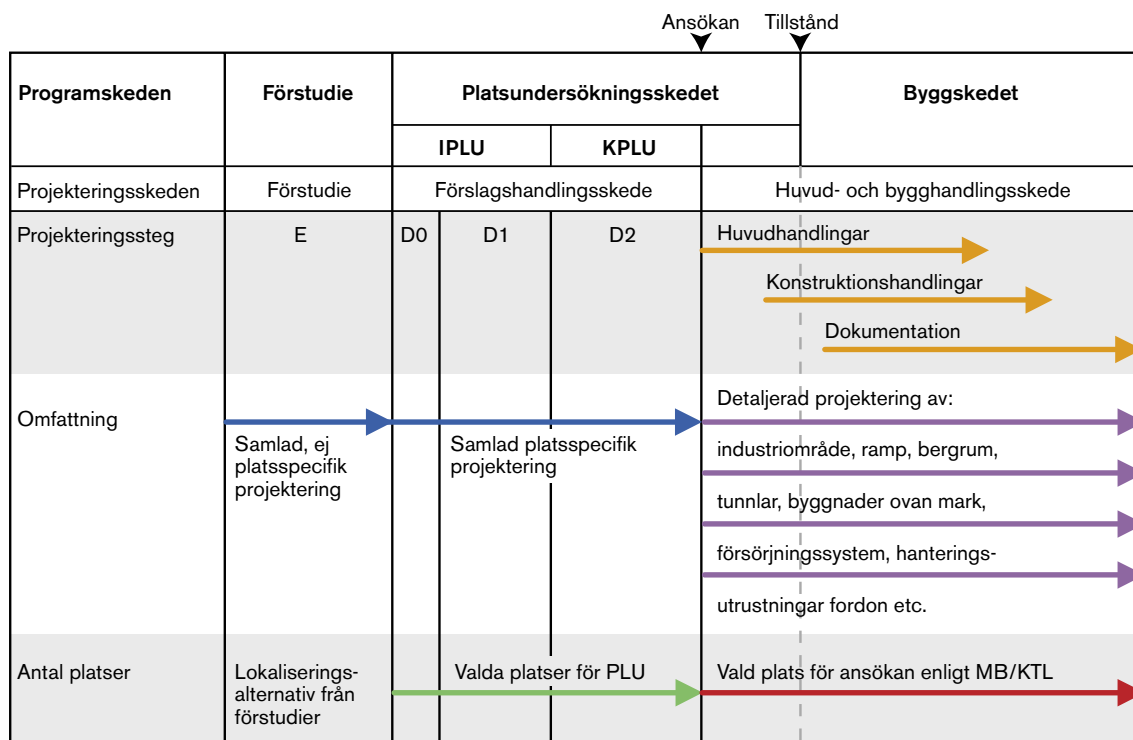
Inför platsundersökningsskedet sammanställdes hittillsvarande projektering till en heltäckande anläggningsbeskrivning, som redovisar SKB:s generella referensutformning av djupförvaret. Uppgiften under platsundersökningsskedet är att ta fram platsanpassade utformningsförslag samt planer för detaljundersökningar och bygge för de studerade lokaliseringalternativen. Startpunkten är den generella referensutformningen, som successivt anpassas till de platsförhållanden som undersökningarna redovisar. Parallellt implementeras tekniska lösningar för delsystem och andra resultat som pågående utvecklingsarbete levererar (se avsnitt A4.4).

Kraven på den platsanknutna projekteringen styrs av de generella målen för platsundersöknings-skedet och det efterföljande byggskedet. De innebär att de anläggningsbeskrivningar och planer som redovisas ska vara tillräcklig preciserade för att:

- Ligga till grund för säkerhetsbedömningar (PSE efter inledande platsundersökningar) och i slutskedet säkerhetsanalyser (SR-Site efter den kompletta platsundersökningen) som visar att ett djupförvar på den aktuella platsen uppfyller säkerhetskraven.
- Ligga till grund för en miljökonsekvensbeskrivning som visar att djupförvarsprojektet kan genomföras med acceptabla konsekvenser för människa och miljö.
- Visa att ett djupförvar, på den aktuella platsen, kan byggas och drivas med känd teknik och så att krav på personsäkerhet, arbetsmiljö, rationalitet och kostnadseffektivitet uppfylls.

Projekteringen görs i steg på det sätt som visas i figur 11. Fram till tillståndsansökan genomförs arbetet i tre steg (D0, D1, D2) för de aktuella kandidatplatserna. Därefter startar, parallellt med myndigheternas tillståndsberedning, arbetet med huvudhandlingar för ett djupförvar på vald plats, i första hand för de anläggningsdelar som kommer först i byggprocessen efter ett tillståndsbeslut.

Uppläggningsplan fram till tillståndsansökan ansluter till etappindelningen av hela djupförvarsprojektet enligt figur 10. I skede D0 (beteckningar enligt figur 11) studeras möjliga lägen och utformningar av anläggningsdelar och verksamhet som djupförvaret kräver ovan mark. Detta skede är i det närmaste avslutat. I skede D1, som pågår för närvarande, tillkommer preliminär layout och dimensionering av anläggningsdelarna under mark, baserat på data från den inledande platsundersökningen. En nyckelfråga i detta skede är vilken utbredning (ytbehov under mark) ett förvar på platsen skulle få, i relation till de bergvolymerna som står till förfogande. Principlösningar och lägen för nedfarter (ramp och schakt) och centralområde är andra frågor som behandlas och som har stor betydelse för helhetsresultatet. Den preliminära anläggningsbeskrivning som tas fram redovisar bland annat lägen och utbredning för anläggningsdelar ovan och under mark. Beskrivningen används bland annat som underlag för fortsatta undersökningar, för samråd om miljökonsekvenser och för SR-Can.



Figur 11. Plan och skedesindelning för projektering av djupförvaret.

I skede D2 revideras anläggningsbeskrivningen så att informationen från den kompletta platsundersökningsetappen beaktas. En av slutprodukterna är den anläggningsbeskrivning som ger underlag för SR-Site och miljökonsekvensbeskrivningen, och som ingår i underlaget för ansökan, se avsnitt A4.5.

Projekteringen och den stegvisa utbyggnaden av djupförvaret på den plats som väljs kommer att pågå i många år. Arbetet kommer att påverkas av bland annat bergförhållandena. Det är därför viktigt att de lösningar som tas fram under platsundersökningsskedet så långt möjligt ger flexibilitet för tänkbara förändringar i senare skeden. Mer eller mindre definitiva beslut måste ändå fattas i frågor som har stor betydelse för den platsspecifika utformningen av vissa delysystem och även för anläggningen i sin helhet.

Tabell 3a och 3b visar projekteringsfrågor som står i centrum under platsundersökningsskedet, i den meningen att viktiga val eller prioriteringar ska göras. Signifikanta kopplingar till utformningen av anläggningen som sådan (layout, konstruktion, bygge, drift), långsiktig säkerhet och funktion, samt hälso- och miljöaspekter indikeras i kvalitativ form. Frågorna spänner över ett vitt fält med avseende på utvecklingsbehov, och tabellerna 3a och 3b motsvarar en grov uppdelning i två kategorier:

- Tabell 3a avser frågor eller systemdelar som kan sägas vara ”konventionella” i den meningen att de inte är unika för djupförvaret – motsvarande funktioner återfinns i andra berganläggningar och teknik finns att tillgå.
- Tabell 3b avser frågor eller systemdelar som kräver omfattande utvecklingsarbete, därför att de är unika för djupförvaret, eller att tillgänglig teknik måste modifieras i större omfattning.

Projekteringen av de delar som anges i tabell 3a är med något undantag inte kopplad till långsiktig säkerhet annat än indirekt. Därmed kan den kunskap och teknik som krävs till stor del hämtas utifrån och arbetet består väsentligen av att med stöd av denna kunskap, olika utredningar och alternativjämförelser anpassa lösningar till djupförvarets krav och platsens förutsättningar. Som framgår av tabellen gäller detta för:

- Infrastruktur och anläggningsdelar ovan mark (konventionella mark- och anläggningsarbeten).
- Tillfartsalternativ (principlösning och lägen).
- Bergmassor (uppföring, hanteringsgång, behandling).
- Ventilation och dränage av berganläggningarna.

Tabell 4 sammanfattar etappmål för dessa frågor, för projekteringskedena D1 respektive D2 samt underlag (huvud- och bygghandlingar) som behöver tas fram i nästa skede. Notera att D1 och D2 är anläggningsbeskrivningar som ska redovisas vid bestämda tidpunkter enligt figur 11. Huvud- och bygghandlingar tas däremot fram successivt under byggskedet, i den takt de behövs för upphandlingar av entreprenader.

De frågor eller systemdelar som återges i tabell 3b är enligt ovan alla föremål för teknikutveckling, i vissa fall med stöd av grundläggande forskning. De lösningar som tas fram implementeras successivt i projekteringsprocessen. Avsnitt A4.4 ger en översikt över etappmål med mera kopplade till platsundersökningsskedets projekteringssetapper. Status och program för utvecklingsarbetet redovisas i kapitel 11.

Tabell 3a. Viktiga frågor för platsanpassad projektering. Lösningar för djupförvaret baseras huvudsakligen på befintlig kunskap och teknik, som anpassas till aktuella krav och platsens egenskaper. Etappmål för projektering redovisas i tabell 4. Kryssen indikerar betydelsefulla kopplingar som måste beaktas i projekteringsarbetet.

| Projekteringsfråga/ systemdel | Utformning/utförande | | | Långsiktig säkerhet och funktion | | Hälsa och miljö | |
|---|----------------------|----------|-------|----------------------------------|-------------|-----------------|-------|
| | Layout | Byggande | Drift | Närrområde | Fjärrområde | Inre | Yttre |
| Infrastruktur och layout för anläggningsdelar ovan mark | + | + | + | | | + | + |
| Tillfartsalternativ | + | + | + | | + | + | + |
| Bergmassor | + | + | + | | | | + |
| Ventilation under mark | + | + | + | | | + | |
| Bergdränage | | + | + | | | + | + |

Tabell 3b. Viktiga frågor för platsanpassad projektering. Lösningar för djupförvaret baseras till stor del på egen teknikutveckling, jämför avsnitt A 4.4. Etappmål för projektering redovisas i tabell 5. Kryssen indikerar betydelsefulla kopplingar som måste beaktas i projekteringsarbetet.

| Projekteringsfråga/ systemdel | Utformning/utförande | | | Långsiktig säkerhet och funktion | | Hälsa och miljö | |
|--|----------------------|----------|-------|----------------------------------|-------------|-----------------|-------|
| | Layout | Byggande | Drift | Närrområde | Fjärrområde | Inre | Yttre |
| Bergbyggnadsteknik | | | | | | | |
| – Drivningsmetoder | + | + | + | + | + | + | |
| – Tätning | | + | + | | | + | + |
| Konstruktionsmaterial | | + | + | + | + | + | |
| Anpassning till bergegenskaper – deponeringsområden/deponeringshål | + | + | + | + | | | |
| Deponeringsteknik | | + | + | + | | + | |
| Buffert | | + | + | + | | + | |
| Återfyllning, förslutning | | | | | | | |
| – Deponeringstunnlar | | + | + | + | + | + | + |
| – Tillfarter, transporttunnlar | | + | + | | + | + | + |
| – Borrhål | | + | + | + | + | | |

Tabell 4. Nuläge och preliminära etappmål för vissa viktiga projekteringsfrågor, enligt tabell 3a.

| Projekteringsfråga/ systemdel | Nuläge, referens | D1 – ansökan för inkapslingsanläggningen | D2 – ansökan för djupförvaret | Huvud- och bygghandlingar |
|---|--|---|---|---|
| Infrastruktur och layout för anläggningsdelar ovan mark Läge och disposition av funktioner i förhållande till lokala förutsättningar. | Generiskt underlag och referenslösningar finns. Första platsanpassning gjord under skede D0. | Alternativa lägen och preliminära utformningar redovisade. Miljöaspekter preliminärt utredda. | Huvudalternativ valt och motiverat. Utformning redovisad för detta alternativ. Miljöaspekter utredda och redovisade. | Erforderliga handlingar för upphandling av entreprenader för markarbeten och infrastruktur. |
| Tillfartsalternativ Olika kombinationer av schakt och lutande tunnel (ramp) kan väljas för transporter och annan kommunikation. | Jämförande analyser av alternativa lösningar genomförda. Referens: Separata schakt för persontransporter och bergupptröding, ramp för transport av transportbehållare med kapsel. | Lägen för schakt, respektive sträckning för ramp, preliminärt bestämda och motiverade. Miljöaspekter preliminärt utredda. | Lägen och dimensioner för schakt valda. Möjligt utförande redovisat. Reviderad sträckning för ramp redovisad. Miljöaspekter redovisade. | Handlingar för att utföra arbeten på platsen framtagna, granskade och godkända. |
| Bergmassor Hanteringsgång för utsprängda bergmassor, från uttag till slutanvändning. Placering av anläggningar, transportvägar. | Hanteringsalternativ, preliminära marknadsförutsättningar med mera har utretts. | Förslag till hanteringsgång för studerade, alternativa lägen för anläggningar redovisade. Miljöaspekter preliminärt utredda. | Hanteringsgång och teknisk lösning redovisad för prioriterat alternativ. Miljöaspekter utredda och redovisade. | Hanteringsgång och tekniska lösningar valda och godkända. |
| Ventilation under mark Systemlösningar och dimensionering. | Preliminär bedömning av ventilationsbehovet ingår i referensutformningen. | Preliminär dimensionering av ventilationssystemet baserad på behovet för anläggningens undermarksdel, inklusive principer för utformning av brandventilation och brandceller. | Ventilationssystemet dimensionerat för ventilationsbehov för anläggningens undermarksdel, inklusive principer för utformning av brandventilation och brandceller. | Ventilationsbehov under byggskede och driftskede klarställt så att erforderliga upphandlingar kan ske i takt med att behov uppstår. |

A4.4 Teknikutveckling

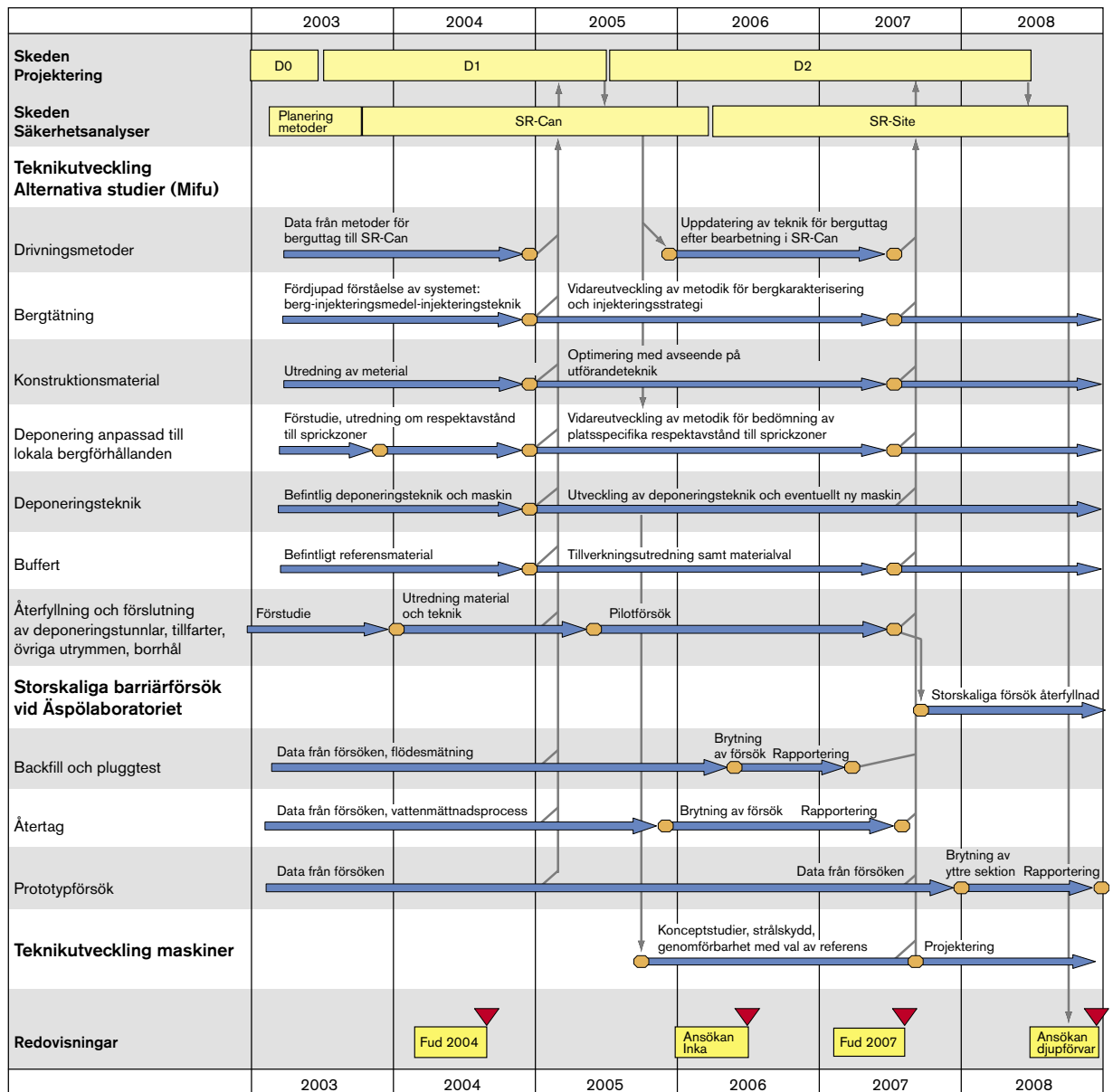
Inför tillståndsansökan för djupförvaret ska utvecklingsarbetet generellt ha nått så långt att de tekniska lösningar som redovisas, för delsystem och för hela djupförvaret på den aktuella platsen, kan visas vara genomförbara samt uppfylla de avgörande säkerhets- och miljökraven. De ska därtill uppfylla rimliga krav på rationalitet och resurseffektivitet i genomförandet av djupförvarsprojektet.

En fullständig redovisning av status och program för teknikutvecklingen ges i kapitel 10. För den platanpassade utformning av djupförvaret som görs under platsundersökningsskedet kan följande utvecklingsfrågor sägas vara särskilt betydelsefulla (jämför tabell 3b):

- Bergbyggnadsteknik (anpassning och utveckling av metoder för drivning, bergstabilisering och tätning).
- Konstruktionsmaterial (för tätning, stabilisering och installationer under mark).
- Bergegenskaper för deponeringsområden och deponeringshål (kriterier, metodik, anpassning).
- Deponeringsteknik (maskiner, hanteringsgång).
- Buffert (material, tillverkning, applicering).
- Återfyllning och förslutning av deponeringshål, tunnlar och borrhål (material och applicering).

Figur 12 visar en översiktlig plan för utvecklingsarbetet, i tidsperspektivet 2008. Som figuren indikerar har resultaten från utvecklingsarbetet sin huvudsakliga tillämpning dels i säkerhetsanalysen, dels i den stegvisa projekteringsprocessen. Tabell 5 ger en översikt över den gällande ”leveransplanen” gentemot genomförandeplanen för djupförvarsprojektet. I tabellen redovisas etappmål, i form av preliminära krav på underlag om de frågor som formulerats kopplade till de olika projekteringskedena. Därutöver ges kortfattade kommentarer till utvecklingsläget och hänvisningar till de avsnitt i huvudrapporten där Fud-verksamheten beskrivs.

Utvecklingsinsatserna ovan avser komponenterna i referenskonceptet, alltså ett förvar enligt KBS-3-metoden och med deponering i vertikala hål i tunnelgolvet. Till det ska läggas det särskilda utvecklingsprogrammet för den variant av KBS-3 där deponeringen sker horisontellt i långa tunnlar (KBS-3H), som redovisas i avsnitt A2.3.5.



Figur 12. Plan för teknikutveckling under platsundersökningskedet.

Tabell 5. Viktiga teknikutvecklingsfrågor – nuläge, planerade insatser samt preliminära etappmål kopplade till projekteringskedan (jämför även tabell 3b).

| Teknikfråga/ systemdel | Fud – nuläge | Fud – planerade insatser, hänvisning | Referensutformning | D1 – ansökan för inkapslingsanläggningen | D2 – ansökan för djupförvaret | Huvud- och bygghandlingar |
|--|---|---|---|---|---|---|
| Bergbyggnadsteknik | | | | | | |
| – Drivningsmetoder Val av teknik för olika förvarsdelar | God kunskapsbas genom egna bergarbeten och FoU, samt mångårigt engagemang i bransch- utvecklingen. | Omfattande utred- ningsarbete med inrikt- ning på närzonens egenskaper och funktion för alternativa drivningsmetoder, se avsnitt 10.1. | Borrning eller sprängning av nedfartsramp, trans- porttunnlar, bergtrum och deponeringstunnlar. Borr- ning av deponeringshål. | Drivningsmetoder och utförande för deponerings- tunnlar, tillfarer och övriga utrymmen preliminärt valda och motiverade. Viktiga kopplingar till andra system- delar redovisade. | Uppdatering av metoder och utförande redovisad. Förnyad analys av kopp- lingar till bygg och drift- säkerhet samt långsiktig säkerhet utförd. Miljö- aspekter redovisade. | Valda metoder ingår i underlaget för entre- prenader för alla bergarbeten, i första skedet för ramp och sänkschakt. |
| – Bergtätning | | | | | | |
| Bergkaraktisering samt material och teknik för tät- ning av bergutrymmen. | Grundläggande och till- lämpad FoU för alla delar av tätningsproblematiken (karaktisering, mate- rial, teknik) pågår sedan länge. Utveckling av tätningsmedel med lågt pH pågår. | Vidareutveckling av metodik för bergkarak- terisering och injekte- ringsdesign. Fortsatt FoU för att utveckla lämpliga material, se avsnitt 10.1. | Förinjektering efter behov, med konventio- nella cementbaserade tätningsmedel. | Grov uppskattning av mängd och fördelning av injekte- ringsmaterial. Principiell påverkan på grundvatten- nivån redovisad. | Plattspecifik redovisning av möjlig tätnings teknik, materialval, bedömd åtgång samt påverkan på långsiktig säkerhet och miljö. | Vald metod för tätning ingår i underlaget för entreprenader för alla bergarbeten, i första skedet för ramp och sänkschakt. |
| Konstruktionsmaterial | | | | | | |
| Material (mängder, egen- skaper, ev konsekvenser) för installationer, stabili- tering, tätning med mera som tillförs förvaret, och kvarlämnas efter avslut- ning | Mängder och fördelningar av konstruktionsmate- rial och material som kommer att lämnas har beräknats, se referens- utformning. | Översyn av material- val, med strävan att cementmaterial som kvarlämnas så långt möjligt begränsas, se avsnitt 10.1. | Mängdberäkningar base- rade på referensutform- ningen av undermarks- anläggningen. Konventio- nella material antas. | Alternativa material utredda m p bygge och drift. Revidering av mängd och typ av konstruktionsmaterial genomförd, och bedöm- ningar gjorda av påverkan på långsiktig säkerhet och miljö. | Konstruktionsmaterial pre- liminärt valda och mängder beräknade. Påverkan på långsiktig säkerhet utredd. Analyser av bygg- och drift- säkerhet samt miljöaspekter redovisade. | Huvud- och bygghand- lingar baseras på valda material och metoder. |
| Anpassning till bergensskaper – deponeringsområden och deponeringshål | Betydande FoU avse- ende respektavstånd och krav på bergförhållanden i deponeringspositioner genomförd. Översyn av metodik för respekt- avstånd pågår. | Vidareutveckling och prövning av metodik för respektavstånd och för val av deponerings- positioner, se avsnitt 19.2.5–19.2.8. | Preliminära riktvärden för respektavstånd i tidiga projekteringskedan, metodik för undersök- ningar etc i senare skeden. | Anpassning av utformning baserad på data från inledande platsundersökning och preliminära projekte- ringsförutsättningar. | Anpassning av utformning baserad på data från kom- plet platsundersökning och uppdaterade projekterings- förutsättningar. | Kriterier och metodik för bestämning av deponeringspositioner godkända, tillämpning baseras på data från detailundersökning. |

Fortsättning nästa sida.

Tabell 5. Fortsättning.

| Teknikfråga/ systemdel | Fud – nuläge | Fud – planerade insatser, hänvisning | Referensutformning | D1 – ansökan för inkapslingsanläggningen | D2 – ansökan för djupförvaret | Huvud- och bygghandlingar |
|---|--|--|--|--|---|--|
| Deponeringsteknik | | | | | | |
| Principiösa, inklusive strålskydd, för hantering och deponering av kapslar. | En demomaskin för deponering av kapslar finns vid Aspölaboratoriet. Olika typer av hanteringsförsök har genomförts med experimentutrustning. | Översyn av funktionskrav, samt tekniska och miljömässiga bedömningar, eventuellt modifiering av maskinens utformning, se avsnitt 10.3. | Enligt demomaskin-Aspö, men med den skillnaden att utrustningen planeras bli spårbundet. | Enligt demomaskin-Aspö, men med den skillnaden att utrustningen planeras bli spårbundet. | Studier av eventuellt modifierat utrustningsmaskin slutförda och utformning vald utformning utförda. Kopplingar till andra systemdelar utredda. | Detaljkonstruktion, tillverkning och tester av deponeringsmaskin med vald utformning utförda. |
| Buffert | | | | | | |
| Materialval, beredning och applicering, funktion på kort och lång sikt. | Kontinuerlig FoU för att utveckla kunskapsbas om egenskaper och funktion. Mer än hundra block i full skala har tillverkats genom enaxlig pressning och installerats i fullstora försök vid Aspölaboratoriet. | Ytterligare forskning inför val av buffertmaterial och om vissa processer. Försök med isostatisk pressning av block, se avsnitt 10.2 och kapitel 17. | Natriumbentonit (MX 80). Block tillverkas med isostatisk pressning. | Aktuell kunskapsbas för referensmaterial (MX 80) eller andra likvärdiga material redovisad. | Uppdaterad kunskapsbas redovisad. Material valt och motiverat. Metoder för tillverkning och applicering utredda och erforderliga tester genomförda. Genomförbarhet visad och miljöaspekter utredda. | Valt system (material, pressutrustning med mera) tillverkat och testat inför framtagning av bygghandlingar för deponeringstunnlar och produktionsbyggnad för pressning av buffert. |
| Aterfyllning och förslutning | | | | | | |
| – Deponeringstunnlar Materialval, applicering, funktion | Omfattande alternativa studier av material och hanteringskoncept genomförda. Teknik och funktion provas i storskaliga försök. | Fortsatt utvärdering av alternativa material och metoder för hantering och applicering, se avsnitt 10.4 och kapitel 18. | MX 80 blandat med bergkross i förhållandet 30/70. | Alternativa material utredda. Minst ett valbart material som uppfyller kraven angivet. Kopplingar till andra systemdelar redovisade. | Platsanpassat referensmaterial valt och visat uppfylla kraven. Samverkan med andra systemdelar (drivningsmetod, tätning) utförd och redovisad. Miljöaspekter utredda. | Valt system för återfyllning (material, utrustning, applicering) tillverkat och testat inför framtagning av bygghandlingar för deponeringstunnlar och produktionsbyggnad. |
| – Tillfarter, övriga utrymmen | Som ovan. | Som ovan. | Som ovan. | Som ovan. | Som ovan. | Som ovan. |
| – Borrhål | Användbara material har inventerats. | Fortsatta studier av material. Sammanställning av koncept för förslutning samt testet i fält, se avsnitt 10.5. | Kompakterade bentonitblock i perforerade kopparrör. | Tätningkrav utredda. Aktuell kunskapsbas för förslutningskoncept redovisad. | Platsanpassat referenskoncept som uppfyller kraven valt. | Detaljkonstruktion, tillverkning och tester. |

A4.5 Säkerhetsanalys

Den samlade planeringen för säkerhetsanalyser under platsundersökningsskedet redovisas i avsnitt A2.3.3. Figur 10 visar i mera detalj kopplingarna mellan säkerhetsanalys, de versioner av platsbeskrivningar som undersökningarna producerar, samt motsvarande förvarslayouter från projekteringen.

Som första steg planeras preliminära säkerhetsbedömningar för de platser som undersöks. För Oskarshamn innebär det separata bedömningar för Simpevarps- respektive Laxemarområdena. I samtliga fall (Forsmark, Simpevarp och Laxemar) utgörs det platsspecifika underlaget för säkerhetsbedömningarna av platsbeskrivande modeller, version 1.2. Huvudsyftet med säkerhetsbedömningar i detta relativt tidiga skede av platsundersökningarna är att avgöra om de tidigare bedömningarna av platserna som lämpliga med avseende på långsiktig säkerhet kvarstår, även med beaktande av de borrhålsdata från förvarsdjup som kommer att finnas tillgängliga. Om resultatet antyder svårigheter att uppfylla säkerhetskraven kan undersökningarna av platsen i fråga komma att avbrytas. Vidare förväntas arbetet ge värdefull återkoppling till planeringen av de fortsatta undersökningarna och till kommande säkerhetsanalyser, i första hand SR-Can.

Säkerhetsredovisningen SR-Site avser att bygga på det samlade underlag som finns när platsundersökningarna med tillhörande projekteringsarbete är slutförda. SR-Site ska visa huruvida hela systemet med inkapsling enligt redovisad teknik och djupförvaring på den plats som slutligen väljs uppfyller myndigheternas krav på långsiktig säkerhet.

Planeringen för SR-Site befinner sig av uppenbara skäl i ett tidigt skede. Avsikten är att göra säkerhetsanalyser för två platser, med motsvarande djupförvaringslösningar. Genomförandet i övrigt blir beroende av den nu pågående processen med att fastställa metodiken för platsundersökningsskedets säkerhetsanalyser, erfarenheterna från de preliminära säkerhetsbedömningarna och SR-Can, samt utfallet av återstoden av platsundersökningarna.

A4.6 Utvärdering och platsval

Det pågående platsundersökningsskedet avslutar den lokaliseringsprocess för djupförvaret som pågått sedan början av 1990-talet. Ledstjärnorna för lokaliseringsarbetet har alltsedan starten varit att:

- Förvaret ska förläggas i urberg, inom Sveriges gränser.
- Miljö-, säkerhets- och strålskyddskraven måste kunna uppfyllas.
- Aktiva lokaliseringsstudier drivs endast i kommuner som har goda geologiska och tekniska förutsättningar och som vill medverka i lokaliseringsprocessen.

Denna inriktning har grundats på bland annat kunskaperna från typområdesstudier, översiktsstudier samt säkerhetsanalyser som SKB bedrivit sedan slutet av 1970-talet. En huvudslutsats från dessa studier är att det kan finnas platser i många av Sveriges kommuner som uppfyller kraven för ett djupförvar.

Efter förstudier i åtta kommuner gjordes under år 2000 en samlad utvärdering av allt underlag. Med det som grund prioriterade SKB områden i Oskarshamn, Tierp och Östhammar för platsundersökningar, samt föreslog ytterligare utredningar av lokaliseringsförutsättningarna i Nyköpings kommun. Underlag och värderingar som SKB baserade dessa ställningstaganden på redovisades utförligt i den så kallade FUD-K-rapporten. I den beslutsprocess som sedan följde gav regeringen klartecken för SKB:s förslag. De aktuella kommunernas ställningstaganden ledde till att platsundersökningarna i Östhammar (Forsmark) och Oskarshamn (Simpevarpsområdet) kunde inledas, medan Tierp och Nyköping avböjde vidare deltagande i lokaliseringsprocessen.

A4.6.1 Lokaliseringsfaktorer

Inför prioriteringen av platser för platsundersökningar redovisade SKB generella lokaliseringsfaktorer för djupförvaret samt en grundläggande struktur för tillämpningen av dessa. Dessa kvarstår som utgångspunkter för det framtida platsvalet, men det omfattande platsspecifika underlag som nu tas fram medför långt bättre möjligheter att tillämpa metodiken och värdera olika faktorer.

Faktorerna indelas i tre huvudkategorier:

- Berggrunden.
- Industrietableringen.
- Samhällsfrågan.

Berggrunden

Berggrundens egenskaper avgör förutsättningarna för långsiktig säkerhet och de tekniska förutsättningarna för att bygga och driva djupförvarets underjordsdelar. Säkerhetskraven och de krav dessa i sin tur ger på berget skiljer djupförvaret från andra berganläggningar. SKB har tidigare redovisat bland annat:

- De krav och önskemål som ställs på berget på platsen för djupförvaret.
- Hur dessa kan omsättas till mätbara parametrar och kriterier som ger vägledning, särskilt under platsundersökningsskedet.

De krav och önskemål som redovisades inför platsundersökningsskedet utgick från den referensutformning för djupförvaret och det kunskapsläge som fanns vid det tillfället. Förändringar av förvarskonceptet eller nya tekniska eller vetenskapliga landvinningar kan givetvis föranleda förändringar av vissa krav, önskemål eller kriterier. Under de år som återstår innan ett platsval ska göras kommer ett omfattande utvecklingsarbete och nya säkerhetsanalyser att genomföras. Detta, tillsammans med erfarenheterna från undersökningsarbetet, kommer med all sannolikhet att motivera revideringar av gällande krav, önskemål och kriterier.

Industrietableringen

Djupförvarsprojektet måste kunna genomföras, som industrietablering betraktat. Det ställer krav på att bygge och drift ska kunna fungera väl rent tekniskt, att resurser finns tillgängliga och att alla krav på skydd och varsamhet mot människa och miljö kan uppfyllas. I dessa avseenden skiljer sig inte djupförvaret på något väsentligt sätt från annan industriverksamhet.

Djupförvarets anläggningar och verksamhet ovan jord innebär att mark behöver tas i anspråk för driftområden och infrastruktur. Anläggningarna ska lokaliseras till mark som är lämplig för ändamålet och lokaliseringen ska inte hämma en långsiktigt god hushållning med mark och vatten.

Djupförvaret är en stor och långsiktig industrietablering som på många sätt är beroende av samhället på den ort och i den region där verksamheten etableras. SKB kommer att, med genomförbarheten av djupförvaret som utgångspunkt, värdera vilka resurser samhället kan tillföra projektet i form av arbetskraft, leverantörer, offentlig och enskild service etc, samt huruvida dessa resurser uppfyller kraven för att projektet ska kunna fullföljas med hög kvalitet. När det gäller den andra sidan av det ömsesidiga beroendet, det vill säga vad projektet kan tillföra samhället, är SKB:s roll att redovisa fakta, men överlåta värderingarna till andra aktörer.

Samhällsfrågan

För att djupförvarsprojektet ska bli genomfört krävs ett politiskt och opinionsmässigt stöd för detta. Den berörda kommunen måste liksom regeringen acceptera lokaliseringen. I praktiken innebär det att det krävs ett förtroende för SKB och kärnavfallsprogrammet hos folkvalda – lokalt och nationellt – samt hos allmänheten, i synnerhet bland närboende.

A4.6.2 Platsval

Undersökningarna i Oskarshamn och Forsmark beräknas i huvudsak kunna slutföras under 2007. Därefter följer en period av analys och sammanställning av resultat för båda platserna. Med detta underlag väljs sedan platsen för djupförvaret, enligt nuvarande tidsplan under senare delen av 2008.

Underlaget och helhetsbedömningen för det slutliga platsvalet kommer att presenteras i den miljökonsekvensbeskrivning som ska åtfölja ansökan om att lokalisera djupförvaret till en specifik plats. Det grundläggande kravet på den plats som väljs är att den uppfyller miljö-, säkerhets- och strålskyddskraven. En genomgång och eventuell revidering kommer att göras av de krav och önskemål på berget som redovisades inför starten av platsundersökningsskedet. Denna genomgång görs med utgångspunkt från säkerhetsanalysen SR-Site, som baseras på platsundersökningsdata i komplett version, samt den tekniska riskvärdering som redovisas i anläggningsbeskrivningen. Detta följs av en sammanvägd bedömning av om säkerhets- och strålskyddskraven uppfylls med hänsyn till de osäkerheter som finns i beskrivningen av platsen och den långsiktiga säkerheten samt osäkerheter i värderingen av de tekniska riskerna.

I miljökonsekvensbeskrivningen beskrivs bedömda effekter och konsekvenser av den påverkan som ett djupförvar på den valda platsen medför, såväl under förvarets bygge och drift som i det långa tidsperspektivet. Vidare görs en avstämning mot miljöbalkens hänsynsregler, mot miljö kvalitetsnormer och mot lokala, regionala och nationella miljömål för att bland annat visa att platsen i enlighet med miljöbalkens intentioner valts så att ändamålet kan uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön. Även kontrollprogram och planerade konsekvenslindrande åtgärder redovisas.

Om båda platserna uppfyller det grundläggande kravet, det vill säga att miljö-, säkerhets- och strålskyddskraven är uppfyllda, så kommer andra faktorer in i bedömningen av vilken plats som bör väljas. Värdering och jämförelse mellan platserna görs då av ett urval av de önskemål som redovisades i FUD-K och de ytterligare önskemål som kan ha framkommit under det omfattande utredningsarbete och samråd som förevarit fram till det att valet görs. I enlighet med miljöbalkens intentioner måste värderingar av önskemål göras ur ett helhetsperspektiv, där även nyttan av att förlägga anläggningarna till den aktuella platsen vägs in.

A4.6.3 Alternativa scenarier

Figur 10 och den plan för platsundersökningsskedet som presenterats ovan avser det referensfall som SKB:s handlingsplan baseras på, det vill säga att de två pågående platsundersökningarna fullföljs, att detta följs av en utvärdering varefter en av platserna väljs, samt att en ansökan avseende denna plats sammanställs och lämnas in. Det finns emellertid alternativa utfall som måste kunna hanteras. Platsundersökningarna och det efterföljande platsvalet bedöms i planeringshänseende som mera osäkert än övriga programdelar. Skälen är i grunden två. Det ena är att kunskapen om förhållandena på förvarsdjup på kandidatplatserna i inledningsskedet är ofullständig. Det andra är det stora inslag av omvärldsberoende som kännetecknar hela lokaliseringsprocessen.

En tänkbar, alternativ utveckling är att undersökningarna successivt gör platsvalet uppenbart, det vill säga att den ena platsen visar sig ha så pass överlägsna meriter att valet i något skede ter sig givet. Det innebär inte att kraven på den plats som väljs på något sätt förändras. Däremot kan det förändra arbetsgång och tidsplan i slutfasen av platsundersökningsskedet, eftersom underlaget

från den plats som uppenbart inte är aktuell då inte i alla avseenden behöver drivas till den nivå som en ansökan kräver, även om det ska vara fullständigt nog för att medge jämförelser i alla relevanta avseenden.

En annan möjlighet är att platsundersökningarna försenas, men i övrigt fullföljs och utvärderas enligt planen för referensfallet. Konsekvensen kan då bli motsvarande förskjutning av tidsplanen i sin helhet. Beroende på hur stor förseningen blir kan detta få mer eller mindre betydelsefulla konsekvenser för kärnavfallsprogrammets övriga delar.

Ett tredje scenario som inte kan uteslutas är att de nu pågående undersökningarna inte meriterar något alternativ för en lokaliseringssökning. Programmet måste då revideras. Vad det kan innebära beror mycket på i vilket skede en revidering blir nödvändig, av vilka skäl, och vilka förutsättningar som då finns att få stöd för ett modifierat program. Den troliga utvägen är att initiera ytterligare lokaliseringssalternativ som kan tas in i underlaget och undersökas. Klart är att hela djupförvarsprogrammet då skulle försenas avsevärt, med åtföljande risker och påfrestningar för bland annat kontinuitet och kompetensförsörjning.

A5 Program för låg- och medelaktivt avfall (Loma)

A5.1 Nuläge

Det låg- och medelaktiva avfall (Loma) som produceras i dag kommer till största delen från drift och underhåll av kärnkraftverken. Kortlivat avfall deponeras i SFR-anläggningen (SFR-1). Avfall som innehåller större andelar långlivade radionuklider mellanlagras av producenterna vid respektive kraftverk, eller av SKB i Clab. Långlivat Loma från forskning, sjukhus med mera mellanlagras i Studsvik. Slutligt omhändertagande av detta avfall ligger emellertid utanför SKB:s åtagande gentemot ägarna och kräver separata avtal. En liten del, mycket lågaktivt avfall, deponeras i markförvar vid kraftverken. Detta är en angelägenhet för kraftbolagen och ligger utanför SKB:s åtaganden.

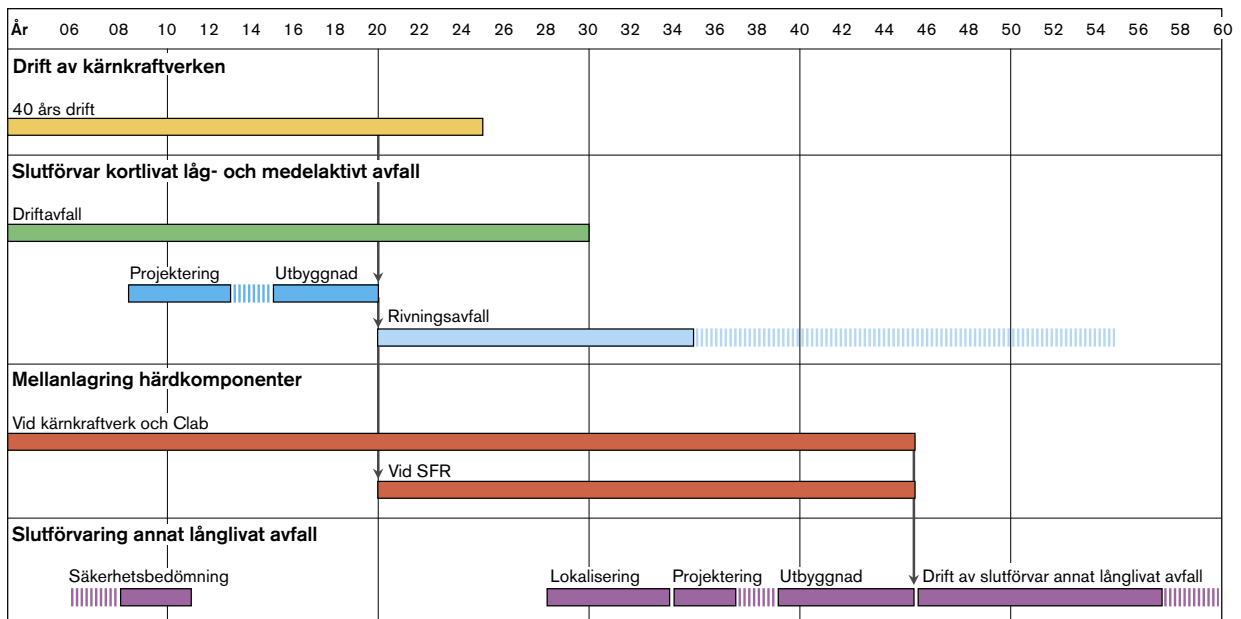
Nuläge och program för forskning och utveckling avseende Loma redovisas i kapitel 25. I det följande ges en översikt över planeringen för att genomföra återstående delar av Loma-programmet.

A5.2 Plan

Figur 13 visar den långsiktiga planeringen för hela Loma-programmet. Huvudpunkterna är fortsatt drift av SFR-anläggningen för slutförvaring av driftavfall, fortsatt mellanlagring av visst långlivat Loma vid Clab, framtida utbyggnader vid SFR för att ta emot avfall från rivningen av kärnkraftverken, samt på längre sikt lokalisering och utbyggnad av ett särskilt slutförvar för annat långlivat avfall.

Loma-programmets omfattning och tidsplan är avhängig planerna för drift, avveckling och rivning av kärnkraftverken. Figur 13 bygger på referensscenariot att verken drivs i 40 år innan avställning, och därefter avvecklas och rivs tämligen omgående. Mycket talar i dag för att drift-tiderna kommer att uppgå till 60 år eller mer. Det är också tänkbart att kraftföretagen väljer att låta sina anläggningar stå ett antal år för avklingning, innan rivningsarbeten i större omfattning påbörjas. Behovet av förvaringsutrymmen för rivningsavfall kan alltså komma att förskjutas framåt i tiden.

De beräknade volymerna av rivningsavfall förutsätter att kraftverken rivs till en bit under marknivå, samt att allt radioaktivt material deponeras i SKB:s anläggningar. På detta sätt kommer behovet av förvaringsvolym inte att underskattas. Däremot kan volymerna bli mindre. Det är exempelvis möjligt att kraftverksägarna väljer att markförvara avfall som endast innehåller små mängder radioaktivt material på liknande sätt som man i dag gör för vissa typer av lågaktivt avfall.



Figur 13. Översiktlig tidsplan för Loma-programmet.

A5.2.1 Slutförvaring – kortlivat avfall

Driftavfall

Med förutsättningen att kärnkraftverken drivs i 40 år kommer kapaciteten i befintliga utrymmen i SFR-anläggningen (SFR-1, volym 63 000 m³) att vara tillräckliga för det rutinmässigt producerade, kortlivade driftavfallet. Skulle drifttiderna förlängas kan en utbyggnad bli aktuell omkring år 2025. I SFR-1 deponeras även avfall från forskning, sjukvård och industri som liknar driftavfallet.

Rivningsavfall

Rivningen kommer att producera såväl kortlivat som långlivat Loma. För det kortlivade rivningsavfallet, som är den volymmässigt dominerande delen, planeras utbyggnader av SFR-anläggningen med ytterligare ett antal bergrum. Med utgångspunkten att kärnkraftverken drivs i 40 år behöver de första av dessa utrymmen stå klara att tas i bruk tidigast år 2020. Projektering och andra förberedelser bör då starta ungefär tio år tidigare. Den totala mängden kortlivat rivningsavfall från kärnkraftverken som ska deponeras i SFR uppskattas till cirka 150 000 m³, det vill säga dubbelt så mycket som avfallet från drift och underhåll.

A5.2.2 Mellanlagring – hårdkomponenter

Den mellanlagring av långlivat Loma, huvudsakligen hårdkomponenter, som krävs i tidsperspektivet fram till år 2020 kan hanteras i befintliga utrymmen i Clab, i kombination med den mellanlagring som kraftföretagen själva ansvarar för i de egna anläggningarna. När rivningen av kärnkraftverken startar tillkommer emellertid ytterligare långlivat rivningsavfall. För detta krävs utrymmen, skilda från Clab, där det annars kan uppstå kapacitetsproblem. Därför planeras nämnda utbyggnader vid SFR även inkludera utrymmen för mellanlagring av långlivat Loma. Efter mellanlagringen ska avfallet överföras till det särskilda slutförvar för annat långlivat avfall som planeras.

A5.2.3 Utbyggnader vid SFR

Förvaringen av de avfallstyper som enligt planeringen tillkommer i SFR-anläggningen ställer ungefär samma tekniska krav på själva anläggningen som det driftavfall som förvaras där i dag. Utbyggnaderna planeras därför bestå av ett antal bergum, på samma djup och av samma typ som dagens. I samband med utbyggnaden planeras också en ”omlicensiering” av hela anläggningen, så att de olika delarna kan ta emot kortlivat avfall från såväl drift som rivning. På detta sätt kan anläggningen utnyttjas optimalt.

Utbyggnaden är tänkt att ske etapper. I en första etapp byggs totalt fyra bergum, två för slutförvaring av kortlivat rivningsavfall, ett som kan nyttjas för mellanlagring av långlivat avfall, samt ett för slutförvaring av stora, udda komponenter från underhåll och reparation av kärnkraftverken. Dessa utrymmen beräknas som nämnts tas i bruk tidigast år 2020. I en andra etapp, 10–20 år senare, tillkommer ytterligare bergum för rivningsavfall. Det rum som planeras nyttjas för mellanlagring av långlivat Loma töms i samband med att avfallet överförs till slutförvaret för annat långlivat avfall. Därmed kan även detta bergum användas för deponering av kortlivat rivningsavfall. I mån av behov kan även ytterligare utrymmen för driftavfall bli aktuella i detta tidsperspektiv.

A5.2.4 Slutförvar för annat långlivat avfall

Bygget av ett slutförvar för annat långlivat fall planeras starta i ett skede när huvuddelen av kärnkraften avvecklats. Anläggningen blir därmed den sista i hela kärnavfallsprogrammet. Med dagens planering bör förvaret stå färdigt för deponering omkring år 2045. Långlivat Loma som produceras dessförinnan mellanlagras enligt ovan.

Planer för en tidig säkerhetsbedömning liksom stödjande forskning avseende slutförvaret för annat långlivat avfall redovisas i kapitel 25. Platsvalet för denna anläggning kräver sin egen lokaliseringsprocess. För att ge denna process tillräckligt med tid, men ändå tillförsäkra att den fortfarande har relevans när anläggningen ska etableras, bör den enligt SKB:s bedömning påbörjas någon gång 2025–2030. I dag är alltså platsvalet en helt öppen fråga, och vare sig en samlokalisering med SFR (men då på större djup), en samlokalisering med det då befintliga djupförvaret, eller en lokalisering till en helt ny plats kan uteslutas.

Det långlivade Loma som ska förvaras i anläggningen kan enklast beskrivas som avfall där en stor del av radionukliderna har en halveringstid överstigande 30 år. Källorna är dels de delar av kärnkraftverken som sitter i eller nära bränslehärden, så kallade härdkomponenter, dels Studsvik (egen verksamhet samt omhändertagande av avfall från industri, sjukvård och forskning). Tanken är också att nyttja förvaret för det kortlivade avfall som uppkommer när Clab och inkapslingsanläggningen rivs. Den utformning som skisserats innefattar bergum (liknande de som finns vid SFR men på större djup och med viktiga skillnader i teknisk utformning) som delar upp anläggningen i tre delar, motsvarande de tre kategorier avfall som ska förvaras.

A6 Ledning, kvalitet och kompetens

A6.1 Organisation och ledningssystem

Nuläge

SKB:s organisation omfattar i dag drygt 220 anställda fördelade på tre orter: Stockholm (huvudkontoret) cirka 130, Oskarshamn (Clab, Äspö- och Kapsellaboratorierna, platsundersökning) cirka 80 och Östhammar (SFR, platsundersökning) cirka 15. Inräknat även externa arbetsinsatser (institutioner, konsulter, entreprenörer) motsvarar kärnavfallsprogrammet uppskattningsvis 500 heltidsarbeten.

Huvuddragen i den nuvarande linjeorganisationen visas i figur 14. Ansvar för Fud-arbetet inklusive Äspö- och Kapsellaboratoriet har samlats i en teknikavdelning. En särskild avdelning har etablerats för platsundersökningarna. En tredje avdelning ansvarar för driften av de befintliga anläggningarna. Till detta kommer ytterligare två avdelningar, en för de administrativa funktionerna och en med ansvar för MKB-verksamhet och kommunikation.

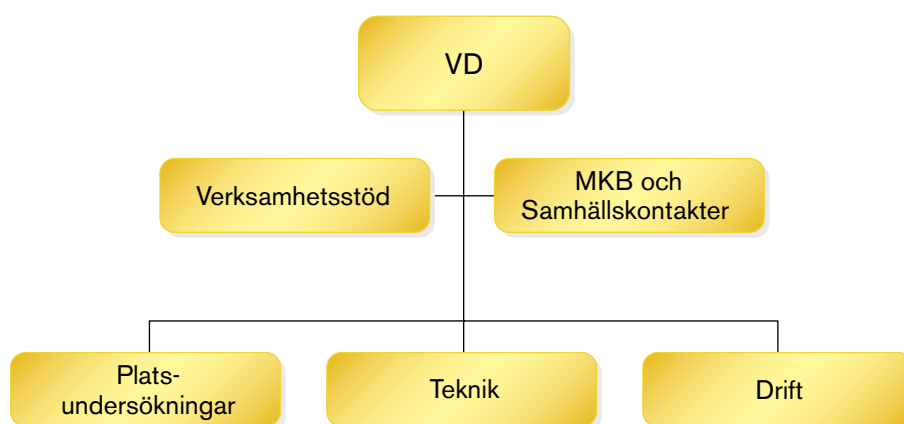
En stor del av verksamheten drivs i projektform. Det gäller bland annat kärnbränsleprogrammets kommande anläggningar, där två stora projekt har organiserats med uppgift att ta fram allt underlag för ansökningarna för inkapslingsanläggningen respektive djupförvaret.

SKB har under en följd av år arbetat fram och implementerat ledningssystem som uppfyller kraven enligt ISO. Sedan år 2001 är systemet certifierat enligt ISO 9001:2000 och ISO 14001:1996. Myndigheterna har vid olika tillfällen granskat och lämnat kommentarer på ledningssystemet. Den omställning av arbetsformer som certifieringsprocessen inneburit är i dag väl inarbetad i organisationen.

Framtida behov

SKB:s personalstyrka, organisation och arbetssätt är nu anpassade för behoven i nuvarande skede i kärnavfallsprogrammet. Inga stora förändringar planeras under de närmaste åren. På längre sikt kommer emellertid verksamheten att förändras radikalt. I och med de förväntade tillståndsbesluten för inkapslingsanläggningen och djupförvaret ska huvuddelen av kärnbränsleprogrammet övergå från att under lång tid ha dominerats av utveckling och planering, till en intensiv genomförandefas. Anläggningarna ska då byggas, till stora delar samtidigt. Verksamheten kommer därmed att både ändra karaktär och expandera kraftigt. Särskilt djupförvaret är en omfattande industrietablering som under den mest intensiva delen av byggskedet bedöms kräva en personalstyrka på storleksordningen 300 personer. Byggandet av inkapslingsanläggningen är till omfattningen ett mindre projekt än djupförvaret, men innehåller å andra sidan unika arbetsmoment. I senare skeden tillkommer etableringen av en sammansättningsfabrik för kapslar samt vissa modifieringar av transportsystemet.

Till arbetsuppgifterna fram till 2008 hör att planera och förbereda en organisation för det kommande byggskedet, i viss mån även för den senare driftfasen. Viktiga frågor i detta planeringsarbete är hur ledning och styrning av de stora byggprojekten ska organiseras samt upphandlingsformerna för entreprenaderna. Vidare finns krav på egen säkerhetsgranskning och kontroll, genomförd under former som ger dessa funktioner en stark och fristående ställning gentemot organisationen i övrigt.



Figur 14. SKB:s linjeorganisation.

Var de kommande anläggningarna lokaliseras kommer att påverka organisationen i hög grad. I och med att byggskedet startar förskjuts SKB:s verksamhet mera mot den ort eller de orter där inkapslingsanläggningen respektive djupförvaret etableras. Vad detta kommer att innebära organisatoriskt beror bland annat på de aktuella orternas och regionernas förutsättningar för rekrytering, och kraven på kontinuitet och kompetensförsörjning. För att den organisatoriska omvandlingsprocess som behövs inför byggandet av anläggningarna ska kunna genomföras på ett bra sätt krävs god framförhållning och hållbara planeringsförutsättningar. Därför är det ur SKB:s perspektiv väsentligt att genomförandeprogrammet är robust och väl förankrat, för att därmed reducera riskerna för stora avvikelser från den övergripande planeringen.

Även Loma-programmet innefattar framtida anläggningsbyggande, med det organisatoriska och resursmässiga krav detta innebär. Omfattningen är dock mindre, och tidsperspektivet längre, än för kärnbränsleprogrammets anläggningar. Den inbördes planeringen mellan kärnbränsle- och Loma-programmen bör ge goda möjligheter att utjämna variationer i resursbehov över tiden: Med målet att förvaringsutrymmen för rivningsavfall med mera ska finnas tillgängliga tidigast år 2020 bör tidig planering och projektering påbörjas i ungefär samma takt som resurser för detta kan lösgöras från djupförvarsprojektet, som då går från planering till byggande. På motsvarande sätt kan utbyggnaden för rivningsavfall starta parallellt med att djupförvaret närmar sig driftskedet. Senare tillkommer lokalisering och etablering av slutförvaret för annat långlivat avfall, i ett skede när övriga anläggningar är i drift.

A6.2 Kompetensförsörjning

Nuläge

SKB:s kompetensprofil i dag speglar båda kärnavfallsprogrammets mer än 30-åriga historia och förändringar under de senaste åren. Kontinuerlig verksamhet under många år och en traditionellt låg personalomsättning har genererat en omfattande kompetensbank som täcker alla delar av SKB:s verksamhet. Inom företaget finns åtskilliga personer, särskilt inom den tekniska expertkåren, med bransch erfarenhet som sträcker sig ända tillbaka till programmets startskede. Detta samlade kunskapskapital är av stort värde och kan bara förvaltas genom en organisation som bedriver aktiv erfarenhetsåterföring.

Under de senaste 3–4 åren har SKB:s personalbehov ökat i betydande omfattning. Initieringen av platsundersökningarna krävde en snabb uppbyggnad av lokala platsenheter och i viss mån även centrala stabsenheter. Andra delar som krävt nytillskott är uppbyggnaden av system för kvalitets- och miljöledning. En ökning har också skett vid laboratorierna, i takt med att resurskrävande fullskaleförsök blivit dominerande inslag.

Behoven har mötts med en kombination av nyrekrytering och upphandling av specialistkompetens på konsultbasis. Expansionen är nu i huvudsak genomförd. Den förnyring som blivit resultatet öppnar nya möjligheter att via erfarenhetsåterföring förvalta det befintliga kunskapskapitalet i organisationen.

Framtida behov

I jämförelse med andra industriföretag har SKB goda förutsättningar att förutse kompetensbehov och därmed kunna planera kompetensförsörjningen med god framförhållning. Programmet för det återstående utvecklingsarbetet och för att bygga och driva anläggningarna är till innehåll och omfattning relativt väl definierat. Ekonomiskt finns det få verksamheter som har så goda och långsiktigt hållbara förutsättningar som kärnavfallsprogrammet. De planeringsmässiga osäkerheter som ändå finns ligger främst i samhällets syn på kärnavfallsprogrammet, med de konsekvenser det kan få beslutsprocesser och inte minst tidsplaner.

I det tidsperspektiv som gäller för tillståndsansökningarna för kärnbränsleprogrammets anläggningar (2006–2008), är SKB nu kompetensmässigt väl rustat för sitt uppdrag. Det gäller både nyckelkompetenser och bemanning kvantitativt sett. Det finns emellertid också en sårbarhet i form av otillräcklig redundans inom vissa strategiskt viktiga nischer där kompetens är svår att hitta och/eller tar lång tid att utveckla. Ett exempel är system- och säkerhetsanalyser, men det gäller även vissa discipliner inom geovetenskap, radiologi och kärnteknik. Ansvar för att sådana osäkerheter identifieras och elimineras i tid ligger på företagets löpande, strategiska personalplanering.

När tillståndsansökningarna har lämnats övergår kärnbränsleprogrammet för SKB:s del i en beredningsfas inför besluten om anläggningarna. Det är då viktigt att behålla kontinuiteten i kompetensen, även om det kan komma att råda viss osäkerhet om tidsåtgången för och utfallet av beslutsprocessen. SKB:s huvuduppgifter under detta skede blir att driva vidare de verksamheter som inte primärt berörs av besluten, att på olika sätt stå till förfogande för beslutsprocessens aktörer, samt att förbereda etableringsfasen för både inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

Inför byggandet av inkapslingsanläggningen och djupförvaret ställs stora krav på väl förberedd kompetens för bland annat ledning och styrning av stora anläggningsprojekt, upphandling och kvalitetskontroll. Att bygga anläggningar är i sig ingen nyhet för SKB, och kunskaperna från utbyggnaderna av SFR, Clab och Äspölaboratoriet blir en värdefull kärna i den kompetens som måste byggas upp. Djupförvaret är emellertid en etablering i avsevärt större skala än de tidigare anläggningarna. Byggskedets behov väcker också frågan om tillgången till utförarkompetens inom delar av byggsektorn, framförallt bergbyggande. De ambitiösa planer som i dag finns för utvecklingen av landets infrastruktur förväntas bidra till en branschvolym som är tillräcklig för att säkra kontinuiteten inom denna sektor. I vilken utsträckning resurser finns att tillgå när djupförvaret ska byggas kan avgöras av om andra, stora bergbyggnadsprojekt sammanfaller tidsmässigt.

Långsiktig branschutveckling

Utvecklingen inom nyckelområden som kärnteknik, strålskydd och geovetenskap liksom motsvarande sektorer av utbildningsväsendet får på lång sikt stor betydelse för hela kärnavfallsprogrammets förutsättningar för kompetensförsörjning. En stor del av den senior-kompetens inom dessa områden som nu finns i programmet (och hela kärnkraftsbranschen) har sina rötter i en tid när kärnkraft sågs som en expansiv framtidsbransch med stor attraktionskraft och en stark ställning i utbildningsväsendet. I dag får branschen sägas tillhöra den skara av mogna industribranscher som har svårare att attrahera den yngre generationen. Aktiv utbildning och forskning är en grundförutsättning för att återväxten ska kunna tryggas.

På sikt är utvecklingen också starkt avhängig vad som händer med kärnkraften och kärnteknisk utveckling i Sverige och världen. Dagens svenska situation, med ett i tiden oklart avvecklings-scenario, försvårar bedömningar av såväl behoven som den möjliga återväxten av kompetens. Hittills har dock farhågor om kompetensbrist inom det kärntekniska området inte besannats, men uppmärksamhet på frågan är befogad. Inom strålskyddssektorn har det från branschen uttryckts en oro för den långsiktiga kompetensförsörjningen, framförallt i det skede då kärnkraftssektorn kommer att domineras av avveckling av kärnkraftverken och avfallshantering.

Förkortningar

| | |
|-------------|--|
| Abaqus | Finite-element-datorkod för hållfasthetsberäkningar. |
| ACL | Aktivt centrallaboratorium, Studsvik. |
| Adopt | EU-projekt. Thematic network on advanced options for partitioning and transmutation. |
| ADS | Accelerator driven system. Acceleratordrivna system. |
| AECL | Atomic Energy of Canada Ltd, Kanada. |
| AFCI | Advanced fuel cycle initiative. |
| Amber | Datorkod för säkerhetsanalys (biosfären). |
| Andra | Agence National Pour la Gestion des Dechets Radioactifs, Frankrike. |
| Apse | Experiment vid Äspölaboratoriet, Pelarförsöket eller Äspö pillar stability experiment. |
| ASCII | American standard code for information interchange. |
| ATB | Transportbehållare för använt kärnbränsle och förbrukade hårdkomponenter. |
| ATW | Accelerator-driven transmutation. Acceleratordriven transmutation. |
| BAM | Bundesanstalt für Materialprüfung i Tyskland. |
| Barra | Enresa-projekt. |
| Bastra | EU-projekt. Adopt cluster, Transmutation – Basic studies. |
| BEM | Boundary element method. |
| Benchpar | EU-projekt. Benchmark tests and guidance on coupled processes for performance assessment of nuclear waste repositories. |
| Big Bertha | Fullskaleförsök, utsvällning av bentonit. |
| Bio42 | SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i biosfären (Proper-delmodul). |
| Bioclim | EU-projekt. Modelling sequential biosphere systems under climate change for radioactive waste disposal. |
| Biomass | IAEA-projekt. Programme on biosphere modelling and assessment. |
| Biomat | Datorkod (biosfären). |
| Biopath | SKB:s datorkod för radionuklidtransport i biosfären. |
| Bioprot | Internationellt projekt om biosfärsaspekter på bedömningen av djupförvarets långsiktiga säkerhet. |
| Bios | Biological iron oxides. Biologiska järnoxider. |
| BNFL | British Nuclear Fuels Ltd. |
| BWR | Boiling water reactor. Kokarvattenreaktor. |
| CAD | Computer aided design. |
| Calixpart | EU-projekt. Cluster Partition, Selective extraction of minor actinides from high activity liquid waste by organised matrices. |
| CEA | Commissariat à l'Énergie Atomique. |
| CEC | Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet. |
| Chan3D | Datorkod, kanalverksmodell i tre dimensioner. |
| Chemlab | Mätsond för undersökningar i borrhål, Äspölaboratoriet. |
| Ciemat | Research Centre for Energy, Environment and Technology in Spain. |
| Clab | Centralt mellanlager för använt kärnbränsle. |
| Code Bright | Datorkod för termo-hydro-mekaniska beräkningar. |
| Comp23 | SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet (Proper-delmodul). |
| Compass | Datorkod för termo-hydro-mekaniska beräkningar. |
| Compulink | SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet (alternativ till Comp23). |
| Confirm | EU-projekt. Cluster Feutra, Collaboration on nitride fuel irradiation and modelling. |
| Connectflow | Datorkod för grundvattenflödesberäkningar. |
| Coup | Datorkod som hanterar transpiration, tillväxt och näringsupptag för vegetation. |
| Crop | EU-projekt. Cluster repository project, a basis for evaluating and developing concepts of final repositories for high-level radioactive waste. |

| | |
|-----------------|---|
| Crud | Chalk river unidentified deposits. Ytkontamination. |
| CTH | Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. |
| DarcyTools | Datorkod för grundvattenflödesberäkningar. |
| Decovalex | Internationellt projekt. Mathematical models of coupled THM processes for nuclear waste repositories. |
| DFN | Discrete fracture network. Diskret spricknätverksmodell. |
| EBS | Engineered barrier system. Tekniska barriärer. |
| EBW | Electron beam welding. Elektronstrålesvetsning. |
| EC | European commission. Europeiska kommissionen. |
| Ecoclay | EU-projekt. Effect of cement water on clay barrier performance. |
| Ecolego | Datorkod för säkerhetsanalys (biosfär). |
| Ecopath | Datorkod för säkerhetsanalys (biosfär). |
| EDF | Ekosystemspecifika doskonverteringsfaktor. |
| EDZ | Engineering disturbed zone. |
| EKG | Teknisk grupp inom SKB för informationsutbyte mellan platsundersökning, analysgrupp, säkerhetsanalys och forskning. |
| Elforsk | Svenska elföretagens forsknings- och utvecklings AB. |
| Embras | IAEA-projekt. |
| Eniq | EU-projekt. European Network for Inspection Qualification. |
| Enresa | Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Spanien. |
| Equip | EU-projekt. Evidences from quarternary infillings for palaeohydrology. |
| Erica | EU-projekt. Environmental Risk from Ionising Contaminants. |
| Esarda | European Safeguards Research and Development Association. Europeiska sammanslutningen för forskning och utveckling på området för kärnämneskontroll. |
| Esdred | EU-projekt. Engineering studies and demonstrations of repository desings. |
| ET | Eddy current testing. Induktiv provning. |
| EU | European Union. Europeiska unionen. |
| Euratom | European Atomic Energy Community. |
| Europart | EU-projekt. European research program for the Partitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels. |
| Examine3D | Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| Farf31 | SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet (Proper-delmodul). |
| Fasset | EU-projekt. Framework for assessment of environmental impact. |
| Febex | Full-scale high level waste engineered barriers experiment, Grimsel, Schweiz. |
| Fep | Feature, events and processes. |
| F-faktor | Transportmotstånd. |
| Flac3D | Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| FoU | Forskning och utveckling. |
| Fracman/PAworks | Datorkod, discrete fracture network for performance assessment. |
| Fracod | Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| FSW | Friction stir welding. Friktionssvetsning. |
| Fud | Forskning, utveckling och demonstration. |
| Fud-K | Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet, 2000. |
| Fuetra | EU-projekt. Adopt cluster, Transmutation – Fuel studies. |
| Gambit | Internationellt projekt. Gas migration in bentonite. |
| Gasnet | EU-nätverk. A thematic network on gas issues in safety assessment of deep repositories for nuclear waste. |
| Geotrap | OECD/NEA-projekt. Radionuclide migration in geologic, heterogeneous media. |
| GIA | Global isostatic adjustment. |
| Gis | Geografiskt informationssystem. |

| | |
|--------------------|---|
| Goldsim | Datorkod för säkerhetsanalys (biosfären). |
| Hindas | EU-projekt. Cluster Bastra, High and intermediate energy nuclear data for accelerator driven systems. |
| HMC | Hydro-mekanisk-kemisk. |
| HPF | Internationellt projekt. Hyperalkaline plume in fractured rocks, Grimsel, Schweiz. |
| HRL | Hard rock laboratory. |
| HTGR | High-temperature gas-cooled reactor technology. |
| HTO | Tritierat vatten. |
| IAEA | International Atomic Energy Agency. |
| Ibeco Deponit CA-N | Kalciumbentonit från Milos. |
| ICP-AES | Inductively coupled plasma – optical emission spectroscopy. |
| ICP-MS | Inductively coupled plasma – mass spectrometer. |
| ICRP | International Commission on Radiological Protection. |
| IJC | International joint committee, Äspölaboratoriet. |
| InCan | EU-projekt. In can processes. |
| INF | Institutionen för neutronforskning vid Uppsala universitet. |
| Inka | SKB-projekt. Projektering av inkapslingsanläggningen. |
| IPCC | Intergovernmental panel on climate change. |
| IPLU | Inledande platsundersökning. |
| IRPA | International Radiation Protection Association. |
| ISA | Isosackarinsyra. |
| ISO 14001 | Internationell kvalitetsstandard, miljöledningssystem. |
| ISO 9001 | Internationell kvalitetsstandard. |
| ISTC | International Science and Technology Center. |
| ITU | Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe. |
| IUR | Internationella Radioekologunionen. International organisation of radioecologists. |
| JNC | Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan. |
| JobFem | Datorkod för termomekaniska analyser. |
| JRC | Joint Research Center i Holland. |
| Kasam | Statens råd för kärnavfallsfrågor. |
| KBS | Kärnbränslesäkerhet. |
| KBS-3H | Variant av KBS-3, horisontell deponering med flera kapslar efter varandra i medellånga deponeringshåll. |
| KBS-3-metoden | SKB:s referensmetod för att ta hand om använt kärnbränsle. |
| KBS-3V | Referensvariant av KBS-3, vertikal deponering med en kapsel i varje deponeringshåll. |
| K_d | Grundämnesspecifika fördelningskoefficienter. |
| KPLU | Komplett platsundersökning. |
| K-S-P | Hydrauliska parametrar. Konduktivitet(K)-mättnad(S)-tryck(P). |
| KSU | Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB. |
| KTB | Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. |
| KTH | Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. |
| KTL | Kärntekniklag. SFS 1984:3 Lag om kärnteknisk verksamhet. |
| KTS 001 | SKB:s tekniska specifikation – Copper ingots and billets for canister components. |
| Lasgit | Experiment vid Äspölaboratoriet, Large scale gas injection test. |
| Loma | Låg- och medelaktivt avfall. |
| Lot | Experiment vid Äspölaboratoriet, Long term test of buffer material. |
| LTDE | Experiment vid Äspölaboratoriet, Long term diffusion experiment. |
| M3 | Datorkod för hydrokemiska analyser, Mixing an mass balance modelling. |
| Maqarin | Naturlig analogi. I Maqarin i Jordanien finns naturlig cement i berget. |
| Matlab | Kommersiell datorkod för matematiska beräkningar. |
| MB | SFS 1998:808 Miljöbalk. |

| | |
|--------------------|--|
| MBA | Material balance area. |
| Microbe | Mikrobiella experiment vid Äspölaboratoriet. |
| Mistra | Stiftelsen för miljöstrategisk forskning. |
| MKB | Miljökonsekvensbeskrivning. |
| MLH | Medellånga hål, tidig beteckning på KBS-3H. |
| Mock-up | Tjeckiskt experiment i stor skala som simulerar ett vertikalt deponeringshål med kapsel och buffert. |
| Mox | Mixed oxide fuel. |
| MSRE | USDOE-projekt. Molten Salt Reactor Experiment. |
| Muse | EU-projekt. Cluster Bastra, Demonstration of the physical principles of an external source-driven sub-critical core at near zero power. |
| MX-80 | Natriumbentonit från Wyoming. |
| Nagra | Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz. |
| Nanet | EU-projekt. Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication. |
| Natt | Projekt finansierat av SKB, SKI och kraftföretagen i Sverige. Neutrondata för accelerator driven transmutationsteknik. |
| NDT | Non destructive testing. |
| NDT Reliability | Forskningsprogram vid BAM för att kartlägga OFP-metodernas tillförlitlighet. |
| NEA | Nuclear Energy Agency, Paris. |
| Net.excel | EU-projekt. Network of excellence in nuclear waste management and disposal. |
| NF-Pro | EU-projekt. Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies. |
| NGI | Norwegian Geotechnical Institute. |
| Nimonic 105 | Nickelbaserad superlegering. |
| Nirex | Nirex Ltd. |
| NKS | Nordiskt kärnsäkerhetssamarbete. |
| n-TOF | Neutron time-of-flight facility in Cern. |
| Nucltran | SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet. |
| Numlib | Rutinbibliotek för numeriska beräkningar. |
| Numo | Waste management organisation of Japan. |
| OECD | Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. |
| OECD/NEA | Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency. |
| OFP | Oförstörande provning. |
| Ondraf/Niras | Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials. |
| Opalinus | Schweiziskt projekt. Performance assessment of a high-level radioactive waste repository in Opalinus clay host. |
| OPG | Ontario Power Generation. |
| ORNL | Oak Ridge National Laboratory, USA. |
| Padamot | EU-projekt. Palaeohydrogeological data analysis and model testing. |
| Particle Flow Code | Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| Partition | EU-projekt. Adopt cluster, Partitioning. |
| Partnew | EU-projekt. Cluster Partitioning, New solvent extraction processes for Minor Actinides. |
| PDS-XADS | EU-projekt. Adopt, Preliminary design studies of an experimental accelerator-driven system. |
| PFBerg | Djupförvar. Projekteringsförutsättningar Berg. |
| PFC | Particle flow code. Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| Phreeqc | Datorkod för kopplade geokemi- och transportanalyser. |
| Pick51 | Proper delmodul för kommunikation med ASCII-filer. |
| PMMA | Polymethylmethacrylate autoradiographs. |
| POD | Probability of detection. |
| Posiva | Posiva Oy. |

| | |
|--------------|---|
| Prism | Datorkod för probabilistiska beräkningar av radionuklidtransport i biosfären. |
| Proper | SKB:s datorkodpaket för hantering av deterministiska och probabilistiska beräkningar av hydrologi och radionuklidtransport. |
| Prototyp | EU-projekt. Full scale testing of the KBS-3 concept for high-level radioactive waste. |
| PSACoin | OECD/NEA projekt. Probabilistic system assessment codes intercomparison. |
| PSI | Paul Scherrer Institute, Schweiz. |
| PWR | Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor. |
| PVT | Metod för att mäta reaktionskinetik (pressure-volume-temperature). |
| Pyrorep | EU-projekt. Cluster Partition, Pyrometallurgical processing research programme. |
| RedImpact | EU-projekt. Impact of reduction and waste treatment techniques. |
| Retrock | EU-projekt. Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments. |
| Rex | Experiment vid Äspölaboratoriet. Redox experiment in detailed scale. |
| RH | Relative humidity. Relativ fuktighet. |
| Rixs | Resonant inelastic X-ray scattering. |
| RMN-bentonit | Tjeckisk bentonit. |
| RNR | Experiment vid Äspölaboratoriet. Radionuclide retention experiment. |
| ROC | Risk of false calls. |
| RVS | Rock visualisation system. |
| SAD | ISTC-finansierat projekt. Creation of sub critical assembly driven by proton accelerator. |
| Safe | SKB-projekt. Förnyad säkerhetsredovisning för slutförvaret för driftavfall, 2001. |
| Safir-2 | Belgiskt projekt. Belgian programme on high-level and long-lived waste. |
| SBM | Schaktborrningsmaskin. |
| SEM-EDS | Scanning electron microscope – Energy dispersive spectroscopy. |
| SFR | Slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. |
| SFS | EU-projekt. Spent fuel stability under repository conditions. |
| Simulink | Kommersiell datorkod för matematiska beräkningar. |
| SKB | Svensk Kärnbränslehantering AB. |
| SKB 91 | SKB-projekt. Betydelsen av berget för KBS-3-förvarets långsiktiga säkerhet, 1992. |
| SKI | Statens kärnkraftinspektion. |
| SLU | Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala. |
| Soil | Datorkod som hanterar transpiration, tillväxt och näringsupptag för vegetation. |
| Spire | EU-projekt. Cluster Testra, Irradiation effects in martensitic steels under neutron and proton mixed spectrum. |
| SQC | SQC Kvalificeringscentrum AB. |
| SR 95 | SKB-projekt, mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel, 1996. |
| SR 97 | SKB-projekt, säkerheten efter förslutning av djupförvaret, 1999. |
| SR-Can | SKB:s säkerhetsanalys som underlag till ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning. |
| SR-Site | SKB:s säkerhetsanalys som underlag till ansökan om att bygga ett djupförvar. |
| SSI | Statens strålskyddsinstitut. |
| Sum41 | SKB:s datorkod för viktning och summering av tidsserier i biosfären (Proper-delmodul). |
| SveBeFo | Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. |
| Sweclim | Mistra-projekt. Svenskt regionalt klimatmodelleringsprogram. |
| Sysdjup | SKB:s systemanalys som underlag för tillståndsansökan för djupförvaret. |
| Sysinka | SKB:s systemanalys som underlag för tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. |
| TBM | Tunnel boring machine. |
| TBT | Experiment vid Äspölaboratoriet. Temperature buffer test. |
| TDB | OECD/NEA-projekt. Thermodynamic data bases. |
| TDS | Total dissolved solids. |
| Tecla | EU-projekt. Cluster Testra, Technologies, materials and thermal-hydraulics for lead alloys. |
| Tecplot | Datorkod för postprocessering av resultat. |

| | |
|---------------------|--|
| TEF | Technical Evaluation Forums, Äspölaboratoriet. |
| TEM | Transmission electron microscopy. |
| Tensit | SKB:s datorkodpaket för numeriska beräkningar av radionuklidtransport. |
| Testra | EU-projekt. Adopt cluster, Transmutation – technology studies. |
| THM | Termo-hydro-mekanisk. |
| THMC | Termo-hydro-mekanisk-kemisk. |
| TN17-2 | Transportbehållare för använt kärnbränsle. |
| TN17-CC | Transportbehållare för förbrukade härdkomponenter. |
| True | Experiment vid Äspölaboratoriet. Tracer retention understanding experiments. |
| TS01 | Proper delmodul för kommunikation med ASCII-filer. |
| TSL | The Svedberg-Laboratory, Uppsala. |
| TWG | European technical working group of experts on ADS. |
| TWI | The Welding Institute, Cambridge, England. |
| UPC | Universitat Politècnica de Catalunya. |
| URL | Underground Rock Laboratory. |
| US NRC | United States Nuclear Regulatory Commission. |
| USDOE | United States Department of Energy. |
| UU | Uppsala universitet. |
| Wave | Datorkod för bergmekaniska analyser. |
| WPS | Welding procedure specification. |
| Xanes | X-ray absorption near edge structures. |
| XAS | X-ray absorption spectroscopy. |
| XPS | X-ray photoelectron spectroscopy. |
| XRD | X-ray diffraction. |
| Yalina | ISTC-finansierat projekt. A sub-critical, thermal facility set up in Minsk. |
| Zedex | Experiment i Äspölaboratoriet. Zone of excavation disturbance experiment. |
| α -strålning | Alfastrålning. |
| β -strålning | Betastrålning. |
| γ -strålning | Gammastrålning. |
| σ | Bergspänning. |
| @Risk | Kommersiellt riskanalysprogram. |
| 3D | Tredimensionell. |
| 3DEC | Datorkod för bergmekaniska analyser. |