

# **FUD-program 2001**

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

September 2001

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Box 5864

102 40 Stockholm

Tel 08-459 84 00

Fax 08-661 57 19





# **FUD-program 2001**

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

September 2001



# Förord

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 2001. Programmet redovisar SKB:s planer för perioden 2002–2007. Det vi närmast överblickar är perioden 2002–2004. 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.

SKB presenterade i december år 2000 förslag till lokaliseringar av djupförvaret och det underlag som legat till grund för valet samt program för undersökningar på dessa platser. SKI och Kasam lämnade i juni 2001 sina yttranden till regeringen efter en omfattande granskning. SKB har i avvaktan på regeringens beslut inget nytt att tillföra när det gäller lokaliseringsprocessen.

Detta FUD-program skiljer sig från de närmast föregående genom att det koncentrerar sig på frågor som relaterar till forskning och teknikutveckling. Frågor som rör lokalisering av våra anläggningar kommer att redovisas mer ingående i samband med ansökningar till myndigheter och i därtill hörande miljökonsekvensbeskrivningar. Detta program är också annorlunda upplagt än de tidigare programmen. Vi utgår från myndigheternas krav på den långsiktiga säkerheten och kopplar detta till dels utvecklingen av säkerhetsanalysens metodik, dels forskningen om de långsiktiga processerna i förvaret. Programmen för säkerhet och forskning länkas sedan ihop med programmen för utveckling av metoder och instrument inför platsundersökningarna och utformningen av djupförvaret, inkapslingsanläggningen och kapseln. Avslutningsvis behandlas också programmen för alternativa metoder, rivning och annat långlivat avfall. Det är vår förhoppning att en sådan struktur och ett sådant betraktelsesätt ger en tydligare bild av vilka faktorer som är viktigast för säkerheten i förvaret och på vilka områden vi koncentrerar våra insatser.

Stockholm i september 2001

**Svensk Kärnbränslehantering AB**



*Peter Nygårds*

VD



*Tommy Hedman*

Chef Säkerhet och Teknik



# Sammanfattning

Föregående FUD-program från 1998 kompletterades i december 2000 med en samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Eftersom den senare redovisningen ligger nära i tiden har SKB valt att koncentrera FUD-program 2001 på forskning och teknikutveckling. Remissynpunkter från tidigare FUD-program och kommentarer från granskningen av säkerhetsanalysen SR 97 utgör viktiga underlag för FUD-program 2001. Det har inte varit möjligt eller lämpligt att i denna rapport beakta alla synpunkter som framkommit i myndigheternas yttranden över kompletteringen till FUD-program 98 som redovisades i juni. Många av granskningskommentarerna kommer därför att behandlas i det fortsatta arbetet med programmen för platsundersökningarna.

Ett övergripande mål för SKB är att starta den inledande driften i ett djupförvar för använt bränsle år 2015. Detta förutsätter att platsundersökningar har inletts i början av år 2002 och att de olika skedena har genomförts utan större förändringar. Reguljär drift bör då kunna inledas i början av 2020-talet innan förvaringsutrymmena i CLAB är fyllda och på så vis undviks ytterligare utbyggnad. Inkapslingsanläggningen bör vara färdig att starta ungefär ett år innan djupförvaret är färdigt.

Framtida FUD-program kommer sannolikt att lägga tyngdpunkten något olika beroende på olika skeden och ansökningar. FUD-program 2004 förutses ge en central plats åt kapseln och inkapslingstekniken. I FUD-program 2007 kan djupförvarstekniken och fortsatt arbete med alternativa deponeringsmetoder bli viktiga att behandla. FUD-program 2010 ska ge underlag för slutligt val av deponeringsmetod. Allt detta framgår av den övergripande tidsplanen som redovisas i kapitel 1.

I tidsplanen ingår även att genomföra säkerhetsanalyser av djupförvaret då data från platsundersökningarna finns tillgängliga. Dessa analyser ska ge underlag för val av plats och kommer att föregås av preliminära säkerhetsbedömningar baserade på data från det inledande platsundersökningsskedet. Metoderna som används för att analysera den långsiktiga säkerheten utvecklas på grundval av erfarenheterna från SR 97. Centrala delar i säkerhetsanalysen är systembeskrivningar samt val och analys av scenarier. Detta anpassas och utvecklas nu ytterligare med sikte på att ta hand om data från platsundersökningarna. I SR 97 användes en förenklad metod för riskberäkningar, som nu har utvärderats och förbättrats med hjälp av nyutvecklade analytiska modeller.

Säkerhetsanalys, forskning och förvarsutformning har ett nära samband. Utformningen av förvaret är en förutsättning för säkerhetsanalysen. Forskningen bidrar med kunskap om vilka förändringar som kan ske på lång sikt i förvaret. Omvänt kan resultaten av en säkerhetsanalys användas för att förbättra förvarsutformningen och – inte minst – till att prioritera olika forskningsområden. Detta har vi använt för att bygga upp strukturen i stora delar av rapporten. Istället för att som brukligt redovisa forskningen ämnesvis har vi knutit den till processerna som har betydelse för den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar för använt bränsle. Vår förhoppning är att man lättare ska kunna avgöra varför det forskas, var kunskapen är tillräcklig och vilka områden som kräver ytterligare studier.

**Det använda bränslet** utgör avfallet som ska isoleras i djupförvaret. Olika processer kommer med tiden att förändra tillståndet i bränslet och kapselns hålrum. En stor del av dessa processer sker endast om kapselns isolering bryts och vatten tränger in i kapseln. Radiolys av vatten är till exempel en sådan process som i sin tur kan påverka de kemiska förhållandena i kapseln. Vatten i kapseln kan även orsaka korrosion av bränslets kapslingsrör. Om

vatten kommer i kontakt med bränslet kan det leda till upplösning av radionuklider. Upplösta radionuklider kan diffundera i vattnet och därigenom ta sig ut ur en skadad kapsel. Därför är bränsleupplösning en viktig process för att visa vad det skulle innebära om någon kapsel inte klarar av att isolera bränslet, vilket är en del av säkerhetsanalysen. Bränsleupplösning är ett prioriterat område i FUD-program 2001.

**Kapseln** är en viktig barriär i förvaret. Den består av olika delar. Ytterst finns ett hölje av koppar och insatsen är av gjutjärn – yttre beständighet förenad med inre styrka. Korrosionsbeständighet och hållfasthet är viktiga egenskaper. Därför är processer som berör dessa egenskaper angelägna kunskapsområden. Stora resurser läggs ner på studier av koppar-korrosion och spänningskorrosion i kopparkapseln. Även korrosion inuti en kapsel behandlas för det fall att vatten skulle tränga in. Studien av hållfasthet som användes till SR 97 behöver moderniseras. Hållfastheten behöver beräknas med mer realistiska materialdata för gjutjärnsinsatsen. SKB kommer även att utreda den långsiktiga säkerheten för en variant av kapseln med något tunnare hölje men med en kraftigare insats.

**Bufferten** av bentonitlera ska skydda kapseln mekaniskt vid mindre berg rörelser. Den ska även fördröja transport av lösta ämnen. Korroderande ämnen ska hindras från att nå kapseln och om kapseln skadas ska bufferten bromsa spridning av radionuklider. Efter att buffert och kapsel placerats i sitt deponeringshål, återstår det för bufferten att nå ett stabilt vattenmättat tillstånd. Detta kan ta något tiotal år. Samtidigt avger kapseln värme som ska ledas ut till berget via bufferten. Det viktiga är att kunna förutsäga buffertens tillstånd efter att den mättats med vatten, vilket är det stabila tillståndet på mycket lång sikt. Därför studeras buffertens inledande utveckling i Äspölaboratoriet och med modeller. Även det vattenmättade tillståndet undersöks. Viktiga processer i det senare fallet är effekter av saltvatten och transport av gas. Alltför höga salthalter kan påverka svällningen av bentonitleran och gas måste kunna ta sig igenom utan att bufferten skadas.

**Återfyllningen** ska stabilisera tunnlarna mekaniskt, hålla bufferten på plats i deponeringshålen och hindra vattenflöde genom tunnlarna. Olika blandningar av bergkross och smektitleror kommer att testas. Utvecklingen på lång sikt styrs i stort sett av samma processer som i bufferten. Viktiga processer som måste utredas ytterligare är betydelsen av svällningen i tunnlarna och påverkan från saltvatten. Återfyllningen är känsligare för saltvatten än den mer kompakterade bufferten.

**Geosfären** ska skydda kapslarna och dessutom utgöra en barriär mot spridning av radionuklider om kapseln skadas. Flera processer i geosfären är viktiga för säkerhetsanalysen, exempelvis grundvattenflöde, jordskalv, mikrobiella processer och matrisdiffusion. Modellerna för grundvattenflöde kommer att vidareutvecklas dels för att hantera bergets heterogenitet på bästa sätt och utgöra underlag för att välja lämpligt berg för placering av deponeringstunnlar och deponeringshål. I SR 97 användes en modell för jordskalv som överskattar risken för rörelser längs sprickor i berget. Därför utvecklas jordskalvsanalysen ytterligare för att bli mer realistisk och mindre konservativ. Grundvattnets kemi på förvarsdjup har studerats ingående och SKB har utvecklat användbara metoder att undersöka en framtida plats. När det gäller att avgöra hur stabila förhållandena är intar mikrobiella studier en särställning. Mikrober bidrar till att bevara miljön syrefri. Mikrobiella processer är ett relativt nytt område som vi fortsätter undersöka. Matrisdiffusion beskriver hur upplösta radionuklider tränger in i bergets mikrosprickor. Därigenom bromsas spridningen av radionuklider längs större vattenförande sprickor i berget. Diffusion i mikrosprickor är väl undersökt, men sambandet med vattenflödet och geometrin i bergets system av större sprickor behöver studeras ytterligare.

Färgstarka beskrivningar av jordbävningar efter inlandsisen framförs ibland som argument mot att bygga ett djupförvar. Bodagrottorna, i trakten av Iggesund, har framhållits som exempel på våldsamheten i en sådan process. SKB har låtit undersöka Bodagrottorna med



borrning och geofysiska mätningar. Fenomenet är emellertid ytligt och inga spår av uppspräckning på djupet har hittats. Resultaten tyder snarare på att bildningen är orsakad av inlandsisens erosion. Vi vet att det har förekommit mycket stora jordbävningar i samband med inlandsisen, t ex Pärvie- och Landsjärvförkastningarna. Men vi vet också att effekten av jordskalv på undermarkskonstruktioner är små och att ett djupförvar kan utformas så att det motstår även mycket stora skalv i närområdet. För att skaffa oss ytterligare kunskap på området sammanställs och granskas alla kända postglaciala förkastningar som dokumenterats i skandinavisk och kanadensisk berggrund. Svenska och utländska experter ska få tillfälle att gå igenom detta mot bakgrund av våra krav på säkerhet.

**Biosfären** är en väsentlig del av det som säkerhetsanalysen måste behandla. Det är i biosfären människan lever och det är här konsekvenserna av ett utsläpp uppkommer. Vi måste också räkna med att biosfären förändras i framtiden. Landhöjningen och variationer i klimatet är exempel på sådant som påverkar biosfärens utveckling på lång sikt. Omsättningen av radionuklider i biosfären beräknas med modeller (kompartimentmodeller). De har utvecklats väsentligt på senare tid och ytterligare förbättringar kommer att göras för att få modellerna ordentligt anknutna till verkligheten. Kunskapen om mekanismerna för överföring av radionuklider mellan olika delar av biosfären har förbättrats och modellerna kommer i framtiden att baseras på detta. Exempel på ekosystem som studeras och behandlas i modellerna är skog, myrmark och sediment.

**Klimatet** kommer att förändras i framtiden. Olika klimutförhållanden kommer att avlösa varandra under de hundratusen år och längre som vi behandlar i säkerhetsanalysen. Det är därför nödvändigt att analysera hur olika typer av klimat – om de inträffar – skulle påverka förvaret och säkerheten. Permafrost är exempel på ett klimattillstånd som kommer att undersökas närmare och ett projekt med den inriktningen planeras för närvarande. Ett annat exempel är det glaciala tillståndet.

**Naturliga analogier** – exempel i naturen – gör det möjligt att undersöka processer som pågått under mycket längre tid än vad som normalt kan följas med experiment i laboratorium eller i fält. Naturliga analogier är ofta svåra att utvärdera i detalj, men de kan ändå vara ett bra komplement till rent experimentella undersökningar. I det fortsatta programmet har materialanalogierna en framträdande plats. Typiska materialanalogier är naturliga förekomster av koppar eller bentonit, men även betong kan undersökas. Dels undersöks prov av gammal betong, dels platser där cementmineral förekommer naturligt.

**Äspölaboratoriet** är en plats för både forskning, utveckling och demonstration. Det mesta av forskningen är inriktad på processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten. Den tekniska utvecklingen är inriktad på djupförvaret. På Äspö prövas de olika stegen i att bygga förvaret, placera in kapslarna och bufferten samt återfylla och försluta. Även platsundersökningsmetoder utvecklas där. Flera organisationer i andra länder deltar i arbetet i Äspölaboratoriet. Såväl forskningen som den tekniska utvecklingen på Äspö beskrivs på flera olika ställen i den här rapporten. Forskningen behandlas där processerna beskrivs, t ex kapitlet om buffert (kapitel 6) och återfyllning (kapitel 7). Utveckling och demonstration av teknik behandlas i kapitlet om instrumentutveckling (kapitel 13) och djupförvaret (kapitel 14). Eftersom Äspölaboratoriet är en så pass viktig del i SKB:s FUD-program redovisas det även separat i ett eget kapitel. Äspölaboratoriet kommer att fortsätta att spela en viktig roll och drivas vidare, åtminstone tills Prototypförvaret har öppnats och utvärderats i början av 2020-talet.

**Instrument och metoder för att hantera mätresultat** behövs för att genomföra platsundersökningarna. I första hand används befintlig och kommersiellt tillgänglig teknik, men för speciella behov utvecklar SKB både instrument och metoder. Många av de mätmetoder som kommer att användas är sedan länge väl testade och dokumenterade. Andra kräver fortfarande en del utveckling eller åtminstone en genomgång och uppbyggnad, t ex

seismiska mätningar, bergspänningsmätningar, GPS-nät, seismologiska nät, mätning under borrhning, hydrologiska mätningar, kemiska mätningar och mätningar av bergets transportegenskaper. I förberedelserna ingår även att se längre framåt. Preliminära program utarbetas för både mätningar och observationer i detaljundersökningsskedet, under drift och efter förslutning.

**Djupförvaret** för använt bränsle utvecklas med KBS-3-konceptet som grund. I fullskaleförsök i Äspölaboratoriet prövas borrhning av deponeringshål, inplacering av kapslar och bentonit samt återfyllning. Prototypförvaret i Äspölaboratoriet kommer att innehålla sex deponeringshål med kapslar och försöket ska pågå i 20 år. I stället för använt bränsle används elektriska värmare, men i övrigt efterliknas verkliga förvarsförhållanden i största möjliga utsträckning. Utrustning för att deponera buffert och kapslar kommer att vidareutvecklas. Målet är att demonstrera deponeringstekniken i sin helhet inför den inledande driften i djupförvaret. Material och teknik för återfyllning, förslutning och tätning av borrhål utvecklas också på Äspö. KBS-3 är grunden men vi kommer även att utreda varianter på det konceptet. En sådan variant är medellånga hål som innebär att kapslarna deponeras horisontellt. Utredningen får visa om horisontell deponering kan erbjuda praktiska, miljömässiga eller ekonomiska fördelar jämfört med vertikal deponering.

**Inkapslingsanläggningen**, där det använda bränslet ska placeras i kopparkapslar, ligger ännu så länge på ritbordet. På Kapsellaboratoriet i Oskarshamn utvecklas tekniken för att svetsa på kopparlocket. Elektronstrålesvetsning är den metod som idag utvecklas på Kapsellaboratoriet. Den alternativa tekniken friction stir welding provas också för att sedan överförs till Kapsellaboratoriet och utvecklas i full skala. Där utvecklas även teknik för att undersöka svetsfogen. På annat håll prövas olika tillverkningsmetoder för de delar som ingår i kapseln. Uppdraget ges till flera olika leverantörer, för att vi ska kunna avgöra vilken teknik som passar bäst. En del av de kapslar som tillverkas används för experiment i Äspölaboratoriet.

**Alternativa metoder.** Även om vi i Sverige i praktiken redan valt metoden geologisk deponering för att ta hand om det använda bränslet, har SKB bestämt sig för att följa utvecklingen av de två alternativen separation och transmutation samt deponering i djupa hål. Framtiden för båda metoderna är minst sagt oviss, men det kan ändå vara berättigat att ägna ett visst intresse åt att följa det som görs internationellt på de två områdena.

**Rivning.** Innehavaren är den som ansvarar för att den kärntekniska anläggningen till slut dekontamineras och rivs när den har tjänat ut. SKB genomför generella studier av rivning för att säkerställa att kompetens finns och att kostnaderna bedöms på ett korrekt sätt. Kraftverken ansvarar själva för planering, tillståndsansökan och genomförande av rivning av de egna anläggningarna. Omhändertagandet av avfallet samordnas med SKB och ett slutförvar för det kortlivade avfallet ska vara färdigt att ta emot avfall när rivningen påbörjas i större omfattningen. Under den kommande sexårsperioden är inriktningen att utveckla metoder för torr mellanlagring av härdkomponenter, införa system för registrering av avfallet, se över rivningslogistiken, uppskatta doser i samband med rivning och genomföra preliminära säkerhetsanalyser av slutförvaringen. Bevakning av utländsk verksamhet är ett viktigt inslag i utvecklingen.

**Långlivat avfall från rivningen** i form av interna delar och härdkomponenter från reaktorerna ska också deponeras i ett slutförvar. Detta förvar ska även rymma långlivat låg- och medelaktivt avfall från forskning, industri och medicin (det kortlivade deponeras redan idag i SFR). En preliminär utformning av förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall har studerats och en säkerhetsanalys genomförts. Förvaret behöver inte tas i drift förrän om 45 år. Inriktningen den kommande sexårsperioden är främst att förbereda framtida säkerhetsanalyser med forskningen om avfallet och processer i förvaret.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	17
1.1	Det svenska systemet	17
1.2	SKB:s långtidsplan	18
1.3	Anpassning av djupförvaring och inkapsling	20
1.3.1	Övergripande systemval	20
1.3.2	Systemanalys och optimering	22
1.3.3	Lokalisering	24
1.4	FUD-programmets inriktning idag och i framtiden	26
<b>2</b>	<b>Säkerhetsanalyser</b>	27
2.1	Bakgrund	27
2.1.1	Metodrapport	28
2.2	Systembeskrivning	29
2.3	Scenarieval	31
2.4	Analys av valda scenarier	33
2.4.1	Data och modeller	33
2.4.2	Risikanalyser och beräkningar	36
<b>3</b>	<b>Forskning kring långsiktig säkerhet</b>	43
3.1	Bränsle	47
3.2	Kapsel	47
3.3	Buffert	47
3.4	Återfyllning	48
3.5	Geosfär	48
3.6	Biosfär	49
3.7	Klimatförändringar	49
<b>4</b>	<b>Bränsle</b>	51
4.1	Initialtillstånd bränsle/hålrums	51
4.1.1	Variabler	51
4.1.2	Geometri	52
4.1.3	Strålintensitet	53
4.1.4	Temperatur	53
4.1.5	Hydrovariabler	54
4.1.6	Mekaniska spänningar	54
4.1.7	Totalt radionuklidinventarium	55
4.1.8	Gapinventarium	55
4.1.9	Materialsammansättning	56
4.1.10	Vattensammansättning	57
4.1.11	Gassammansättning	57
4.2	Processer i bränsle/hålrums	58
4.2.1	Översikt av processer	58
4.2.2	Radioaktivt sönderfall	59
4.2.3	Stråldämpning/värmealstring	59
4.2.4	Inducerad fission (kriticitet)	60
4.2.5	Värmetransport	60

4.2.6	Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation	60
4.2.7	Termisk expansion/kapslingsbrott	61
4.2.8	Advektion och diffusion	61
4.2.9	Restgasradiolys/syrabildning	61
4.2.10	Vattenradiolys	62
4.2.11	Metallkorrosion	62
4.2.12	Bränsleupplösning	63
4.2.13	Lösning av gapinventarium	72
4.2.14	Speciering, kolloidbildning	73
4.2.15	Heliumproduktion	75
<b>5</b>	<b>Kapsel</b>	<b>77</b>
5.1	Initialtillstånd för kapseln	79
5.1.1	Variabler	79
5.1.2	Geometri	79
5.1.3	Strålintensitet	80
5.1.4	Temperatur	80
5.1.5	Mekaniska spänningar	80
5.1.6	Materialsammansättning	81
5.2	Kapselprocesser	81
5.2.1	Översikt av processer	81
5.2.2	Stråldämpning/värmealstring	82
5.2.3	Värmetransport	82
5.2.4	Deformation gjutjärnsinsats	82
5.2.5	Deformation av kopparkapsel från yttre övertryck	84
5.2.6	Termisk expansion (såväl gjutjärnsinsats som kopparkapsel)	85
5.2.7	Deformation från inre korrosionsprodukter	85
5.2.8	Korrosion gjutjärnsinsats	86
5.2.9	Galvanisk korrosion	86
5.2.10	Spänningskorrosion gjutjärnsinsats	87
5.2.11	Strålpåverkan	87
5.2.12	Korrosion kopparkapsel	88
5.2.13	Spänningskorrosion kopparkapsel	90
5.2.14	Korntillväxt koppar	91
5.2.15	Radionuklidtransport	91
5.2.16	Integrerade studier – skadad kapsels utveckling	91
<b>6</b>	<b>Buffert</b>	<b>93</b>
6.1	Buffertens initialtillstånd	95
6.1.1	Variabler	95
6.1.2	Geometri	96
6.1.3	Porgeometri	96
6.1.4	Strålintensitet	97
6.1.5	Temperatur	97
6.1.6	Smektithalt	97
6.1.7	Vattenhalt	98
6.1.8	Gashalter	98
6.1.9	Hydrovariabler	99
6.1.10	Svälltryck	99
6.1.11	Smektitsammansättning	99
6.1.12	Porvattensammansättning	99
6.1.13	Föroreningshalter	100

6.2	Processer i bufferten	100
6.2.1	Översikt av processer	100
6.2.2	Stråldämpning/värmealstring	101
6.2.3	Värmetransport	102
6.2.4	Vattentransport vid omättade förhållanden	102
6.2.5	Vattentransport vid mättade förhållanden	104
6.2.6	Gastransport/gaslösning	105
6.2.7	Svällning	105
6.2.8	Mekanisk växelverkan buffert/återfyllning	106
6.2.9	Mekanisk växelverkan buffert/kapsel	107
6.2.10	Mekanisk växelverkan buffert/närfältberg	108
6.2.11	Termisk expansion	108
6.2.12	Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert	109
6.2.13	Advektion	111
6.2.14	Diffusion	111
6.2.15	Osmos	111
6.2.16	Jonbyte/sorption	112
6.2.17	Montmorillonitomvandling	113
6.2.18	Lösning/fällning föroreningar	114
6.2.19	Kolloidfrigörelse/erosion	116
6.2.20	Strålinducerad montmorillonitomvandling	116
6.2.21	Radiolys av porvatten	117
6.2.22	Mikrobiella processer	117
6.2.23	Integrerade studier – utveckling vid mättade förhållanden	118
6.2.24	Radionuklidtransport – advektion	121
6.2.25	Radionuklidtransport – diffusion	121
6.2.26	Radionuklidtransport – sorption	122
6.2.27	Speciering av radionuklider	123
6.2.28	Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit	124
<b>7</b>	<b>Återfyllning</b>	<b>125</b>
7.1	Initialtillstånd för återfyllningen	125
7.1.1	Variabler	125
7.1.2	Geometri	125
7.1.3	Porgeometri	125
7.1.4	Strålintensitet	126
7.1.5	Temperatur	126
7.1.6	Smektithalt	126
7.1.7	Vattenhalt	126
7.1.8	Gashalter	126
7.1.9	Hydrovariabler	126
7.1.10	Svälltryck	127
7.1.11	Smektitsammansättning	127
7.1.12	Porvattensammansättning	127
7.1.13	Föroreningshalter	127
7.2	Processer i återfyllning	128
7.2.1	Översikt av processer	128
7.2.2	Integrerade studier – sammansättning och funktion	128
7.2.3	Stråldämpning/värmealstring	130
7.2.4	Värmetransport	130
7.2.5	Vattentransport vid omättade förhållanden	131
7.2.6	Vattentransport vid mättade förhållanden	131

7.2.7	Gastransport/gaslösning	132
7.2.8	Svällning	133
7.2.9	Mekanisk växelverkan återfyllning/närfältberg	133
7.2.10	Termisk expansion	134
7.2.11	Advektion	134
7.2.12	Diffusion	135
7.2.13	Osmos	135
7.2.14	Jonbyte/sorption	136
7.2.15	Montmorillonitomvandling	136
7.2.16	Lösning/fällning föroreningar	136
7.2.17	Kolloidfrigörelse/erosion	137
7.2.18	Strålinducerad montmorillonitomvandling	138
7.2.19	Radiolys av porvatten	138
7.2.20	Mikrobiella processer	138
7.2.21	Radionuklidtransport – advektion	138
7.2.22	Radionuklidtransport – diffusion	139
7.2.23	Radionuklidtransport – sorption	139
7.2.24	Radionuklidtransport – speciering av radionuklider	140
7.3	Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet	140
<b>8</b>	<b>Geosfär</b>	145
8.1	Initialtillstånd för geosfären	145
8.2	Processer i geosfären	145
8.2.1	Översikt av processer	145
8.2.2	Värmetransport	146
8.2.3	Grundvattenströmning	147
8.2.4	Gasströmning/gaslösning	149
8.2.5	Rörelse i intakt berg	150
8.2.6	Termisk rörelse	150
8.2.7	Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor	151
8.2.8	Sprickbildning	155
8.2.9	Tidsberoende deformationer	156
8.2.10	Erosion	157
8.2.11	Advektion/blandning	158
8.2.12	Diffusion	159
8.2.13	Reaktioner grundvatten/bergmatris	160
8.2.14	Lösning/fällning sprickmineraler	162
8.2.15	Mikrobiella processer	165
8.2.16	Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial	167
8.2.17	Kolloidomsättning	167
8.2.18	Gasbildning/gaslösning	169
8.2.19	Metanisomsättning	169
8.2.20	Saltutfrysning	170
8.2.21	Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling	170
8.2.22	Radionuklidtransport – advektion och dispersion	173
8.2.23	Radionuklidtransport – molekylär diffusion samt matrisdiffusion	174
8.2.24	Radionuklidtransport – sorption	175
8.2.25	Radionuklidtransport – speciering	176
8.2.26	Radionuklidtransport – kolloidtransport	176
8.2.27	Radionuklidtransport – transport i gasfas	177
8.2.28	Integrerad modellering – radionuklidtransport	178

<b>9</b>	<b>Biosfär</b>	185
9.1	Bakgrund	185
9.2	Granskningarna av FUD 98, SR 97 och SFL 3-5	186
9.2.1	FUD-program 98	186
9.2.2	SR 97 och SFL 3-5	186
9.3	Förståelse och konceptuella modeller	187
9.4	Modellutveckling	189
9.5	Transportprocesser	192
9.6	Skogsekosystemet	194
9.7	Myrmark	195
9.8	Sediment	197
9.9	Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt	198
9.10	Internationellt arbete	201
9.11	Säkerhetsanalys	202
9.12	Platsundersökningsprogram	203
<b>10</b>	<b>Klimatutveckling</b>	205
<b>11</b>	<b>Naturliga analogier</b>	209
<b>12</b>	<b>Äspölaboratoriet</b>	215
12.1	Syfte med Äspölaboratoriet	215
12.2	Naturliga barriärer	217
12.2.1	TRUE	219
12.2.2	Long Term Diffusion Experiment	219
12.2.3	CHEMLAB	220
12.2.4	MICROBE	220
12.2.5	COLLOID	220
12.2.6	MATRIX	221
12.3	Förvarsteknik	221
12.3.1	Demonstration av deponeringsteknik	223
12.3.2	Prototypförvaret	223
12.3.3	Backfill and Plug Test	224
12.3.4	Återtag	224
12.3.5	Långtidsprov av buffertmaterialets funktion	225
12.4	Basverksamhet vid Äspölaboratoriet	226
12.4.1	Övervakning av grundvattentryck	226
12.4.2	Monitering av grundvattnets kemiska sammansättning	227
12.5	Undersökningsdata och platsbeskrivande modeller	227
12.5.1	Geovetenskaplig databas – SICADA	228
12.5.2	Geografiskt informationssystem – GIS	228
12.5.3	Visualisering av undersökningsdata – RVS	229
12.5.4	Geovetenskapliga modeller över Äspöområdet	230
12.6	Internationellt samarbete	231
12.6.1	Arbetsgrupp (Task Force) för modellering av hydraulisk transport	231
12.6.2	Arbetsgrupp för modellering av tekniska barriärer	233

<b>13</b>	<b>Instrument och metoder för platsundersökningar</b>	235
13.1	Bakgrund	235
13.2	Undersökningar, projektering och säkerhetsanalys	236
13.3	Datahantering och platsbeskrivande modeller	237
13.4	Undersökningsmetoder och mätsystem	239
13.5	Långtidsobservationer	243
<b>14</b>	<b>Djupförvaret</b>	247
14.1	Myndigheternas synpunkter på FUD 98	248
14.2	Konstruktionsförutsättningar, acceptansprövning och optimering	249
14.2.1	Konstruktionsförutsättningar	249
14.2.2	Acceptansprövning	250
14.2.3	Optimering och motiv för vald utformning	250
14.2.4	Utvecklingsprogram	251
14.3	Projektering	251
14.3.1	SKB:s projekteringsmodell	251
14.3.2	Anläggningsutformning	253
14.3.3	Program	254
14.4	Varianter av KBS-3	255
14.5	Teknik – utveckling och demonstration	257
14.5.1	Byggmetoder	257
14.5.2	Tillverkning av bentonitblock och ringar	258
14.5.3	Inplacering av bentonit och deponering av kapslar	259
14.5.4	Återfyllning	260
14.5.5	Förslutning	261
14.5.6	Återtag	261
14.5.7	Konstruktions- och strömmaterial	262
14.5.8	Tätning av undersökningsborrhål	263
14.5.9	Utvecklingsprogram	263
14.6	Transporter	264
14.7	Safeguard och fysiskt skydd	266
<b>15</b>	<b>Inkapsling</b>	269
15.1	Kapselutformning	270
15.2	Kapseltillverkning	271
15.3	Utvecklingsprogram	274
15.3.1	Sammansättning av kompletta kapslar	275
15.4	Kapselabrik	275
15.5	Svetsteknik	276
15.5.1	Elektronstrålesvetsning	276
15.5.2	Friction Stir Welding	278
15.5.3	Kvalificering av svetsmetod	280
15.6	Oförstörande provning	281
15.6.1	Kvalificering av oförstörande provningsmetoder	282
15.7	Kapsellaboratoriet	282
15.7.1	Utvecklingsprogram	282
15.7.2	Demonstration	283



15.8	Inkapslingsanläggning	284
15.8.1	Lokalisering av inkapslingsanläggningen	284
15.8.2	Anläggningsutformning	285
15.8.3	Säkerhet vid drift	285
15.8.4	Safeguards	285
15.8.5	Inkapslingsprocessen	286
15.8.6	Mellanlagring av fyllda kapslar	288
15.8.7	Inkapslingsanläggning lokaliserad till djupförvaret	288
<b>16</b>	<b>Alternativa metoder</b>	291
16.1	Separation och transmutation	291
16.2	Deponering i djupa borrhål	297
<b>17</b>	<b>Rivning</b>	299
17.1	Rivningsteknik	299
17.2	Rivningslogik	302
17.3	Avfallshantering och deponering	302
17.4	Kunskapsläget	303
17.4.1	IAEA	304
17.4.2	OECD/NEA	304
17.4.3	EU	304
17.4.4	Utvecklingsprogram	305
<b>18</b>	<b>Annat långlivat avfall</b>	307
18.1	Långlivat låg- och medelaktivt avfall	307
18.2	Förvaret	308
18.3	Säkerhetsanalysen	309
18.4	Forskningen	311
18.4.1	Inriktning på långsiktig säkerhet	311
18.4.2	Nyvännen kunskap sedan FUD 98	312
18.4.3	Utvecklingsprogram	314
	<b>Referenser</b>	317
	<b>Förkortningar</b>	349



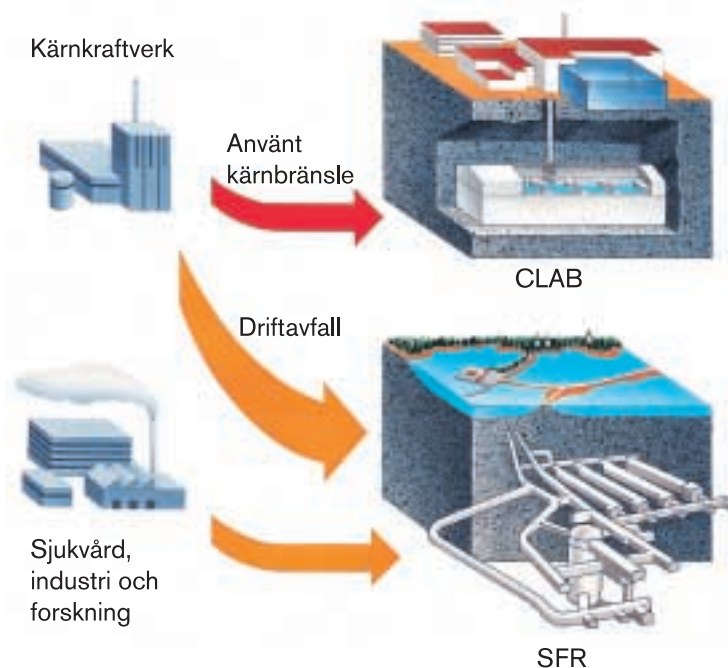
# 1 Inledning

## 1.1 Det svenska systemet

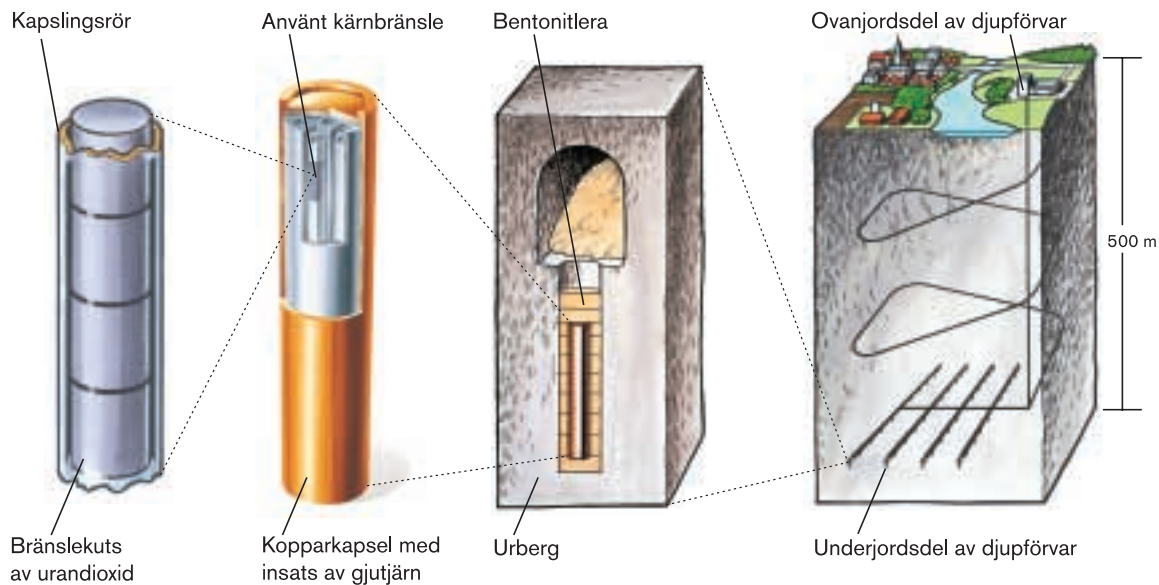
Sverige har producerat el med hjälp av kärnkraft i snart 30 år. Kärnkraftindustrin fick redan på 1970-talet i lag ansvar för att ta hand om allt radioaktivt avfall från sina anläggningar på ett säkert sätt. Ägarna till kärnkraftverken bildade därför 1976 tillsammans Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB. 1981 instiftades också Kärnavfallsfonden för att klara finansieringen.

Under de senaste decennierna har SKB byggt upp ett system för att ta hand om olika typer av radioaktivt avfall, se figur 1-1. Systemet omfattar ett specialbyggt fartyg för transporter, ett slutförvar för olika typer av driftavfall (SFR) och ett centralt mellanlager för använt kärnbränsle (CLAB). Tre viktiga komponenter saknas emellertid för att ta hand om det använda kärnbränslet: en inkapslingsanläggning för att kapsla in det använda bränslet i kopparkapslar och en kapselabrik för att tillverka kopparkapslarna samt ett djupförvar där det inkapslade bränslet kan förvaras på ett långsiktigt säkert sätt. Ett transportsystem som är anpassat till dessa anläggningar behövs också. Dessutom saknas förvarsanläggningar för att ta hand om det avfall som uppstår när de kärntekniska anläggningarna rivs och för andra typer av långlivat avfall än kärnbränsle, exempelvis härdkomponenter.

I mitten av 1970-talet påbörjade SKB utvecklingen av ett koncept för inkapsling och slutförvaring av det använda kärnbränslet och annat långlivat avfall från de svenska kärnkraftverken. Arbetet resulterade under perioden 1977 till 1983 i en serie rapporter som successivt koncentrerades på att det använda kärnbränslet skulle kapslas in i kopparkapslar. Kapslarna deponeras sedan, omgivna av bentonitlera, i vertikala deponeringshål i ett tunnel-system på ungefär 500 meters djup i kristallin berggrund, se figur 1-2. Resultatet, KBS-3-metoden, har sedan dess utgjort referenskonceptet i det svenska programmet /1-1/.



*Figur 1-1. Dagens svenska system för att ta hand om olika typer av radioaktivt avfall.*



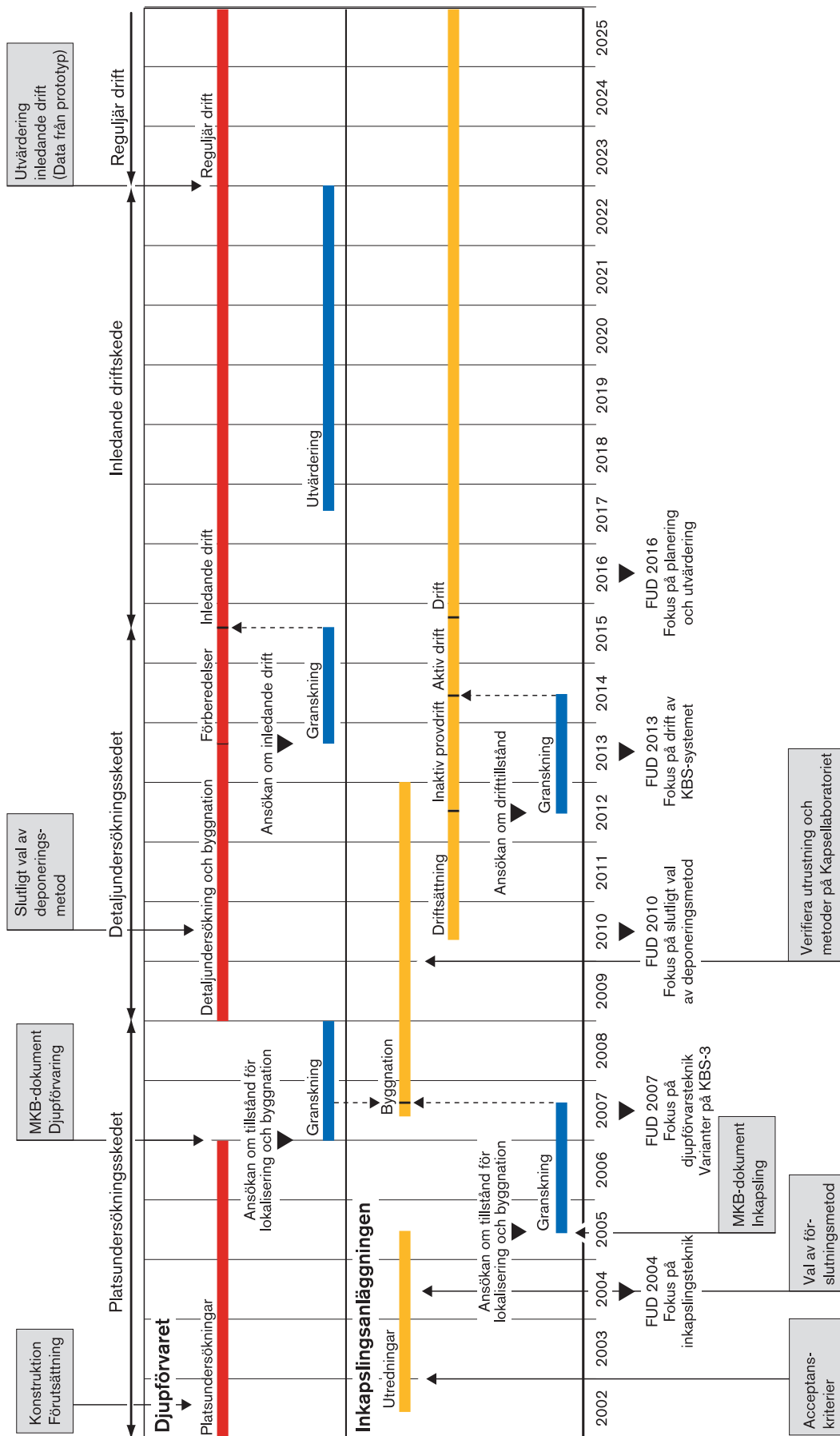
*Figur 1-2. KBS-3-metoden är SKB:s referensmetod för förvaring av använt kärnbränsle.*

## 1.2 SKB:s långtidsplan

Det övergripande målet för SKB:s arbete med att ta hand om det använda kärnbränslet är att den första etappen av djupförvaret ska stå klar år 2015 och att den inledande driften kan påbörjas då. Detta mål förutsätter att alla beslut och medgivanden från myndigheter och kommuner finns framme, så att platsundersökningarna kan inledas i början av år 2002. 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. När platser har valts för undersökningar finns underlag för att göra mer detaljerade och plats specifika tidsplaner för byggandet av djupförvaret.

Bakgrunden till det övergripande målet att starta deponeringen år 2015 är att ansvaret för det slutliga omhändertagandet av det använda bränslet inte ska lämnas över till kommande generationer. De olika stegen vid förverkligandet av djupförvaret bör genomföras i en takt som tar tillvara den kompetens och de resurser som byggts upp och nu finns tillgängliga. Därmed befrämjas kvaliteten och säkerheten i utförandet. Målet är också att den reguljära driften av djupförvaret ska kunna påbörjas innan förvaringsutrymmena i CLAB är fyllda. På så sätt undviker vi en ytterligare utbyggnad av CLAB.

De kommande årens arbete med djupförvaret kommer att ta stora resurser i anspråk. Den kompetens som finns i Sverige när det gäller platsundersökningar, analys av undersökningsresultat och säkerhetsanalyser kommer att vara fullt engagerad för detta. SKB:s avsikt är därför att, under den tidsperiod som överblickas i detta FUD-program, prioritera arbetet med säkerhetsanalyser och utformning av djupförvaret och inkapslingsanläggningen i förhållande till motsvarande arbete med slutförvaret för annat långlivat avfall. De långsiktiga tidsplanerna för djupförvaret och inkapslingsanläggningen visas i figur 1-3.



Figur 1-3. SKB:s referensidsplan för djupförvaret och inkapslingsanläggningen.

En sådan prioritering är möjlig, eftersom ett slutförvar för annat långlivat avfall inte behövs förrän rivningen av kärnkraftverken befinner sig i sitt slutskede. Lokalisering och byggande blir därför med nuvarande tidsplan (figur 17-1) inte aktuell förrän efter år 2035. Den teknik som då blir aktuell är till stora delar redan idag tillämpad i SFR. Arbetet med att utveckla metoder för att konditionera avfallet och för att tillverka avfallskollin kommer att bedrivas parallellt med att utveckla metoder för rivningsarbetet. Utformningen av barriärer och forskning kring långsiktiga processer kommer att fortsätta under den närmaste sexårsperioden. Utgångspunkten är här den preliminära säkerhetsanalys som genomförts /1-2/.

Inkapslingen av bränsle bör starta ungefär ett år innan djupförvaret tas i drift. Bygget av inkapslingsanläggningen bör därför, med hänsyn till tidsplanen för genomförandet, påbörjas före djupförvaret. Det är dock inte lämpligt att börja bygga förrän tidigast när säkerhetsanalysen för djupförvaret har genomförts och granskats. Ansökan för Djupförvaret förutsättes i tidsplanen (figur 1-3) vara baserad på referensutformningen av KBS-3 med deponering i vertikala hål. Eventuell senare övergång till horisontell deponeringsmetod innebär att det behövs en kompletterande system- och säkerhetsredovisning och förnyat beslut från myndigheterna.

### **1.3 Anpassning av djupförvaring och inkapsling**

SKB:s huvuduppgift under de närmaste åren är att anpassa djupförvaring, inkapsling och kapseltillverkning till de platser där vi ska göra platsundersökningar och senare även till den plats där vi ska göra en detaljundersökning. Arbetet med detta har redan kommit en bra bit på väg. Insatserna sker successivt för olika delar och genomförs i princip med följande indelning i skeden:

1. Övergripande systemval (klart).
2. Systemanalys och optimering (pågår).
3. Lokalisering (pågår).

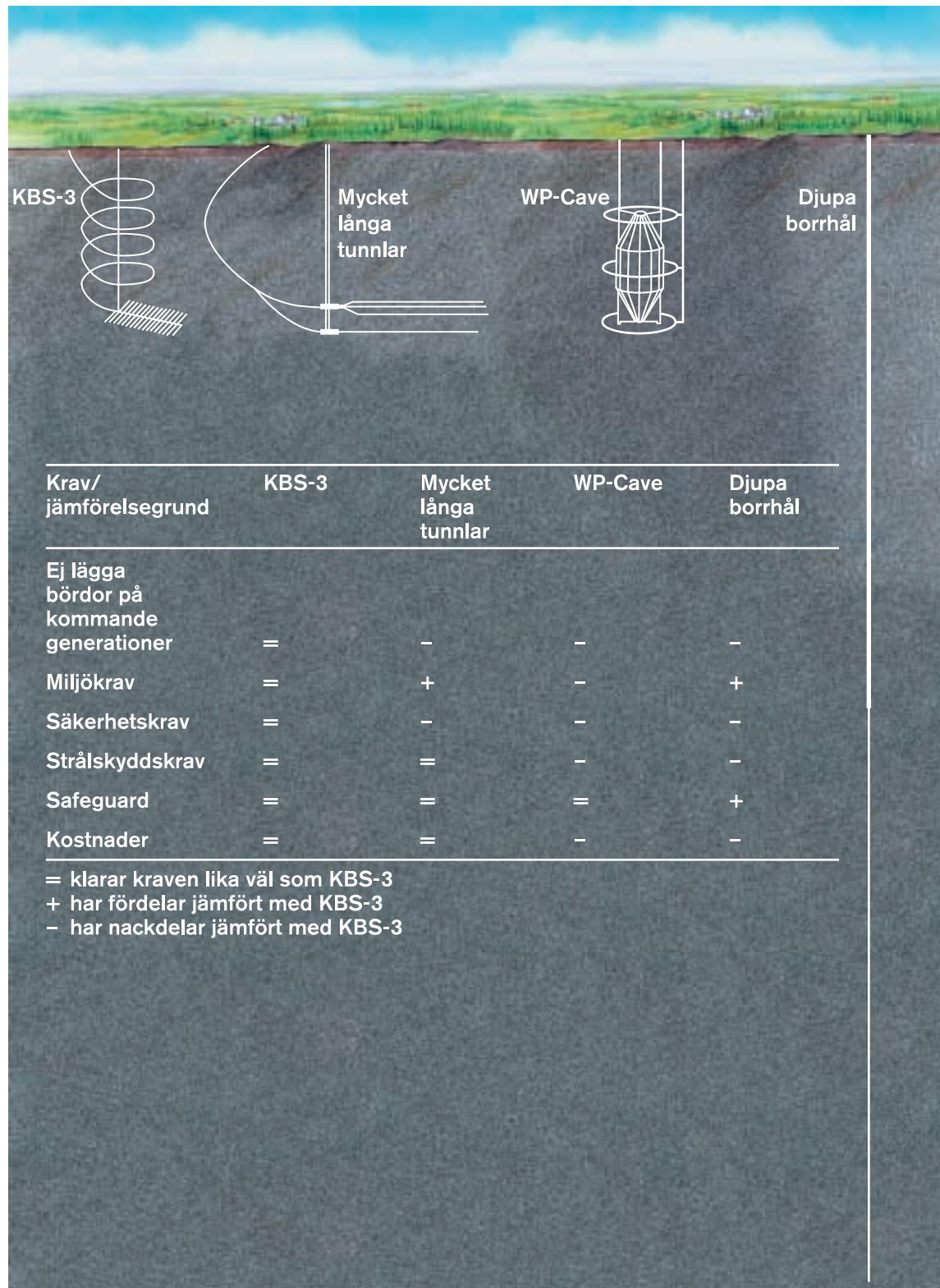
#### **1.3.1 Övergripande systemval**

Internationellt finns två huvudstrategier för hanteringen av det använda bränslet; upp-  
arbetning (med eller utan därpå följande transmutation) och direktdeponering. Valet mellan dessa styrs av om ett land väljer att betrakta bränslet som ett avfall eller som en resurs. I flera stater med stora kärnkraftprogram har upp-  
arbetning setts som en nödvändighet för att på ett uthålligt sätt kunna hushålla med de uranresurser som finns på jorden. Andra länder har, av politiska eller ekonomiska skäl, valt att betrakta bränslet som ett avfall. Oavsett om avfallet består av använt bränsle eller har separerats i en upp-  
arbetningsanläggning är tanken att det ska deponeras i någon form av geologisk formation. Flera barriärer ska därefter tillsammans hindra de radioaktiva ämnena från att nå biosfären.

Idén om geologisk deponering lanserades redan på 1950-talet. Den har sedan dess överlevt alla andra mer eller mindre realistiska förslag som att till exempel skjuta upp bränslet i rymden, deponera det i världshavens djuphavsbottnar eller begrava det i inlandsisen. Anledningen är att geologisk deponering uppfyller alla krav som ställs på en säker slutförvaring och att den kan genomföras med anpassning av idag tillgänglig teknik.



Under år 2000 genomförde SKB en jämförande systemanalys /1-3/. Syftet med rapporten är att jämföra olika strategier för att ta hand om använt kärnbränsle. I denna studerade vi också olika metoder för att utforma ett djupförvar i kristallint berg. Metoderna som ingår i jämförelsen är referensmetoden KBS-3, mycket långa tunnlar, WP-Cave och djupa borrhål, se figur 1-4.



Figur 1-4. Olika tekniska lösningar för ett djupförvar i kristallin berggrund.

I en samlad utvärdering mot de krav som ställts upp, etiska såväl som tekniska, bedömdes KBS-3 vara det mest fördelaktiga alternativet. Ett argument som speciellt talar för KBS-3-metoden är att hanteringen i driftskedet sker på ett sådant sätt att det är möjligt att ha individuell kontroll över såväl kapslar som buffert. Förvaret är också lättare att anpassa till förhållandena på en speciell plats.

### **1.3.2 Systemanalys och optimering**

De tekniska lösningarna för att ta hand om olika typer av radioaktivt avfall 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. Vi ska uppfylla samhällets alla krav på skydd för hälsa och miljö. Våra existerande anläggningar uppfyller dessa mål med god marginal. Djupförvaret, inkapslingsanläggningen och kapsel fabriken ska göra detsamma.

Dimensioneringen av anläggningarnas kapacitet har tidigare gjorts med utgångspunkt från att kärnkraften ska avvecklas till år 2010. Detta antagande förutsatte att ungefär 200 kapslar per år ska kunna tillverkas, förslutas och deponeras. SKB baserar numera sina långsiktiga planer och kostnadsberäkningar på att kraftverken drivs i 40 år. Det innebär att i genomsnitt 165 kapslar per år ska deponeras under en 25-årsperiod. Mot denna bakgrund bedömer vi att en kapacitet på 200 kapslar per år fortfarande är en rimlig dimensioneringsgrund för de olika delarna i systemet.

Utbyggnaden av KBS-3-systemet kommer att ske stegvis. Det innebär att beslut om enskilda anläggningar eller systemdelar kommer att fattas successivt. Detta betyder i sin tur att handlingsfriheten för varje enskild anläggning, och därmed också för hela systemet, gradvis begränsas. Begränsningen av handlingsfriheten sker i olika takt för olika anläggningar. Olika utformningar av djupförvaret kan exempelvis bibehållas även efter beslut om utformningen och lokaliseringen av inkapslingsanläggningen, medan däremot huvuddragen i utformningen av transportsystemet låses när beslutet om inkapslingsanläggningen fattas.

SKB har två verktyg för denna gradvisa systemanpassning: systemanalysen och optimeringsstudier. Systemanalysens syfte är att utforma ett djupförvar med tillhörande mellanlager, inkapslingsanläggning, kapsel fabriken och transporter på bästa möjliga sätt. En systemanalys förutsätter att det finns en frågeställning eller ett problem samt att kraven på systemet och jämförelsegrunderna för analysen har specificerats. I analysen presenteras sedan alternativa sätt att lösa frågeställningen eller problemet. De olika lösningarna utvärderas sedan gentemot de uppställda kraven och jämförelsegrunderna. Det alternativ som bäst uppfyller kraven väljs som huvudalternativ.

Under de kommande åren utreds varianter av KBS-3-metoden. Medellånga håll där kopparkapslarna deponeras horisontellt är en sådan variant, se avsnitt 14.4. Deponering av två kapslar i vertikala håll som görs djupare än i referensutformningen är en annan. Det slutliga valet av deponeringsmetod ska baseras på en utvärdering av säkerhet, teknik, kostnader och miljöaspekter.

Systemanalysens metodik är därmed densamma som vid optimeringsstudier, se avsnitt 14.2. Systemanalysen behandlar dock hela KBS-3-systemet (djupförvar, inkapslingsanläggning, kapsel fabriken och transporter) till skillnad från optimeringsstudierna som behandlar enskilda systemdelar och detaljer. I systemanalysen ingår även att redovisa variationsbredden och hur denna successivt begränsas i och med att systemet byggs ut. Systemanalysen utgör det tekniska underlaget för miljökonsekvensbeskrivningen.



SKB har nyligen presenterat en systemanalys som belyser olika varianter både vad det gäller utformning och lokalisering av de anläggningar som ingår i KBS-3-systemet /1-4/. Under den kommande sexårsperioden planerar SKB att genomföra två systemanalyser. Den första lämnas in i samband med ansökan för inkapslingsanläggningen och behandlar utformningen och lokaliseringen av densamma. Den andra systemanalysen lämnas in i samband med tillståndsansökan för detaljundersökning och behandlar utformningen av djupförvaret på de platser som är aktuella för platsundersökningar samt konsekvenserna av en lokalisering av djupförvaret till dessa.

Parallellt med de övergripande systemanalyserna pågår även ständiga förbättringar när det gäller den tekniska detaljutformningen av såväl djupförvar som inkapslingsteknik och kapseltillverkning.

### **Djupförvaret**

Ett djupförvar av KBS-3-modell 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.

Nuvarande referensutformning bygger på generiska data om svensk berggrund på 400–700 meters djup. Layouten är generell och ska anpassas till förhållandena på platsen. I det fortsatta arbetet med KBS-3-konceptet ska vi bl a studera hur olika förvarsutformningar samt olika buffert- och återfyllningsmaterial påverkar säkerheten och den yttre miljön på de platser som ska undersökas. Frågor som SKB har att ta ställning till är exempelvis om nedfarten till djupförvarets underjordsdel bör utformas som ett schakt eller som en ramp samt om förvaret bör byggas i ett eller två plan. 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.

Förvaret kan inte utformas på detaljnivå innan vi har påbörjat detaljundersökningen. Den inledande driften ska enligt planerna påbörjas år 2015. Då kommer 200–400 kapslar att deponeras i ett första steg. Den slutliga placeringen av deponeringstunnlar och deponeringshål kan inte fastställas förrän efter detaljundersökningen.

### **Inkapsling**

När det gäller förslutning av kopparkapslarna arbetar SKB idag med två parallella svetsmetoder: elektronstrålesvetsning och friction stir welding. Tanken är att det ska finnas två utvecklade förslutningsmetoder att välja mellan. Elektronstrålesvetsning provas idag på Kapsellaboratoriet. Friction stir welding har ännu inte nått samma tekniska utvecklingsnivå som elektronstrålesvetsning. Tekniken kommer emellertid enligt planerna att implementeras på Kapsellaboratoriet under år 2003.

Erfarenheterna från Kapsellaboratoriet kommer att påverka den slutliga utformningen av inkapslingsanläggningen. Under de närmaste åren ska vi göra en systematisk genomgång av inkapslingsprocessen. Förbättringar och förenklingar kommer att göras där så är möjligt.

## **Kapselutformning**

Kapselns nuvarande utformning och storlek baserar sig på att tolv bränsleelement från en kokvattenreaktor eller fyra bränsleelement från en tryckvattenreaktor ska rymmas i den. Denna optimering har gjorts med utgångspunkt från de förutsättningar för utbränningsgrad som gäller idag och från de krav på högsta tillåtna temperatur på kapselns yta som gäller idag. Annan anrikning eller andra typer av bränsle, t ex MOX-bränsle, har högre resteffekt och kan därför leda till att utrymmet i kapslarna inte utnyttjas maximalt.

Tillverkningen av kopparrör till kapslarna har hittills kunnat demonstreras med tre olika metoder: rullformning, extrusion och dornpressning. SKB behöver inte ta slutlig ställning till vilken tillverkningsmetod som ska användas förrän i samband med ansökan för inkapslingsanläggningen. Andra frågor som återstår att slutligt fastställa är bl a kopparrörets tjocklek och vilken hållfasthet som gjutjärnsinsatsens ska dimensioneras för.

### **1.3.3 Lokalisering**

#### **Djupförvaret**

Arbetet med att finna en lämplig plats för djupförvaret pågår. Vi har gjort förstudier i totalt åtta kommuner: Storuman, Malå, Östhammar, Nyköping, Oskarshamn, Tierp, Hultsfred och Älvkarleby. En förstudie är en översiktlig studie av förutsättningarna för att lokalisera ett djupförvar till en kommun med hänsyn till berggrunden, markanvändningen och industrietableringen samt av hur en sådan etablering påverkar miljö och samhälle. Resultatet från förstudierna finns redovisade i slutrapporter från respektive kommun /1-5 till 1-12/. SKB har också genomfört länsvisa översiktsstudier och en utredning om för- respektive nackdelarna vid en lokalisering till norra respektive södra Sverige /1-13/. Den sistnämnda rapporten behandlar även en lokalisering vid kusten jämfört med en lokalisering i inlandet. I december år 2000 presenterade SKB sitt underlag för och motiv till val av KBS-3-metoden och prioriterade platser för platsundersökningar /1-14/.

SKB:s redovisning har under våren 2001 remissbehandlats och granskats av Kärnkraftinspektionen som lämnade sitt yttrande till regeringen den 19 juni. Miljödepartementets vetenskapliga kommitté, Kasam, har också lämnat ett eget yttrande till regeringen. Såväl SKI som Kasam framför i sina yttranden att:

- Den av SKB presenterade kompletteringen av FUD-program 98 är tillfyllest.
- KBS-3-metoden kan utgöra en planeringsförutsättning för det fortsatta lokaliseringsarbetet.
- Platsundersökningar kan påbörjas i de tre av SKB angivna områdena i Oskarshamn, Östhammar och Tierps kommuner.

Det finns därmed ett tydligt stöd från SKI:s och Kasams sida för att lokaliseringsarbetet går över i nästa skede, platsundersökningar. Regeringen väntas behandla ärendet under hösten 2001 och därefter kan de utvalda kommunerna ta ställning till en fortsatt medverkan i programmet. I avvaktan på detta fortsätter SKB sina förberedelser inför eventuella platsundersökningar. Information och samråd fortsätter med kommunerna, närboende och allmänheten. Några avgörande förändringar i eller tillägg till det lokaliseringsunderlag som presenterats har inte skett, därför behandlas lokaliseringsarbetet för djupförvaret inte närmare i denna rapport.

### ***Inkapslingsanläggningen***

Inkapslingsanläggningen kan antingen lokaliseras vid CLAB, vid djupförvaret, vid en befintlig kärnteknisk anläggning eller på någon annan plats. Det är en fördel om anläggningen kan samordnas med befintlig verksamhet och om det finns tillgång till kompetens och erfarenhet av radiologisk verksamhet. Vidare måste transporterna av använt kärnbränsle, resursutnyttjande, miljöpåverkan och samhällliga aspekter beaktas vid lokaliseringen.

SKB:s huvudalternativ är att bygga inkapslingsanläggningen i anslutning till CLAB. Då kan vi dra nytta av de ovan nämnda fördelarna. Vi har också utrett ett scenario där inkapslingsanläggningen förläggs till djupförvaret /1-15/.

När ansökan för att få bygga inkapslingsanläggningen lämnas in ska vi ha reviderat och uppdaterat den befintliga anläggningsdokumentationen /1-16/ och bestämt oss för vilken förslutningsteknik som ska användas. För- och nackdelar med olika lokaliseringar kommer även att framgå av den miljökonsekvensbeskrivning som redovisas i samband med tillståndsansökan.

### ***Kapsel fabriken***

Platsen för kapsel fabriken är ännu inte bestämd. Frågor som måste beaktas vid lokaliseringen är bl a transporter till och från fabriken och tillgång till arbetskraft. Vi kommer att studera möjligheterna att förlägga kapsel fabriken i samma region som inkapslingsanläggningen eller djupförvaret. Även andra alternativ kan bli aktuella.

### ***Slutförvar för annat avfall***

Driften och rivningen av kärnkraftverken ger, förutom det använda kärnbränslet, också upphov till mindre mängder annat långlivat avfall, t ex härdkomponenter. Dessa mellanlagras idag i CLAB. För att avlasta CLAB (och för att undvika en ytterligare utbyggnad) planerar SKB att mellanlagra härdkomponenter under torra förhållanden. Detta kan ske i anslutning till CLAB eller i ett bergrum i SFR. Särskilda kollin och transportbehållare behöver tas fram för detta ändamål.

Ingjutningen för 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 Co-60, klingar av. Om mellanlagringen av bränslet pågår till omkring år 2050 behöver inte slutförvaret för annat långlivat avfall (som härdkomponenter med mera) vara i drift förrän tidigast omkring år 2045.

Lokaliseringen av ett sådant förvar behöver därmed inte aktualiseras förrän omkring år 2035. Bergsalar för denna avfallstyp kan då lokaliseras antingen till SFR, djupförvaret eller till annan plats för använt bränsle.

## 1.4 FUD-programmets inriktning idag och i framtiden

SKB har i detta FUD-program satt säkerhetsanalysen och de långsiktiga processerna i förvaret i centrum. Det råder ett ständigt samspel mellan säkerhetsanalys, forskning och förvarsutformning. Säkerhetsanalysen baseras på en given förvarsutformning och på kunskapen om de långsiktiga förändringar i förvarsmiljön som forskningen levererar. Resultatet av säkerhetsanalysen kan användas till att prioritera nya forskningsinsatser och till att förbättra förvarsutformningen.

Tanken med strukturen i denna rapport är att tydliggöra hur säkerhetsanalysens behov avspeglar sig i de forsknings- och utvecklingsinsatser som görs. I stället för att som brukligt redovisa forskningen ämnesvis har vi, där så är möjligt, knutit den till de långsiktiga processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten i ett djupförvar för använt kärnbränsle. Vår förhoppning är att läsaren på så sätt lättare ska kunna avgöra varför olika forsknings- och utvecklingsinsatser görs, inom vilka områden kunskapen är tillräcklig och inom vilka områden ytterligare insatser behövs.

Kommande FUD-program kommer att på motsvarande sätt inriktas mot olika delar i verksamheten, beroende på vilket verksamhetsskede SKB befinner sig i. Som framgår av figur 1-3 kommer inriktningen enligt planerna att fokusera på följande ämnesområden:

- FUD 2004 Inkapslingsteknik – val av förslutningsmetod.
- FUD 2007 Djupförvarsteknik.
- FUD 2010 Slutligt val av deponeringsmetod.
- FUD 2013 Drift av KBS-3 systemet.
- FUD 2016 Planering och utvärdering.

## 2 Säkerhetsanalyser

### 2.1 Bakgrund

Den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar för använt kärnbränsle 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 förvaret vid någon initial tidpunkt, t ex vid dess förslutning, sedan kartlägga vilka förändringar som kan tänkas ske i förvaret långsiktigt och slutligen beskriva konsekvenserna för människa och miljö. SKB har nyligen genomfört en omfattande analys baserad på berggrundsdata från tre olika platser i Sverige /2-1/. Ingen av platserna är aktuell för lokalisering av ett djupförvar, men tillsammans ger de en god täckning av de olika förhållanden som kan förväntas vid andra platser. Analysen benämns SR 97 och har under år 2000 granskats av svenska myndigheter /2-2/ och, på SKI:s initiativ, av internationella experter /2-3/.

Det råder ett ständigt samspel mellan säkerhetsanalys, forskning och förvarsutformning. Säkerhetsanalysen baseras på en given förvarsutformning och på kunskapen om de långsiktiga förändringar i förvarsmiljön som forskningen levererar. Resultatet av säkerhetsanalysen kan användas till att prioritera nya forskningsinsatser och till att förbättra förvarsutformningen. Nya material eller tillverkningstekniker kan föranleda ytterligare behov av forskning eller analyser. Ett viktigt underlag till detta program för forskning utveckling och demonstration är just resultatet av SR 97 och dess granskningar, vilket kommer att framgå av såväl detta kapitel som av kommande.

Myndigheterna anger genom föreskrifter både kriterier mot vilka resultatet av analysen ska jämföras och krav på innehållet i analysen. SSI gav 1998 ut ”Föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall”, SSI FS 1998:1 /2-4/. I SR 97 tolkade och tillämpade SKB föreskrifterna för första gången och genom granskningen av SR 97 och direkta diskussioner med SSI pågår en dialog om tillämpningen av regelverket. SKI avser under 2001 att ge ut föreskrifter om ”säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” som förväntas påverka utformningen av kommande analyser.

Nästa större säkerhetsanalys för djupförvaret kommer att genomföras då data från platsundersökningarna finns tillgängliga. Dessa analyser kommer att utgöra ett viktigt underlag för valet av plats för ett djupförvar. Analysen biläggs ansökan om tillstånd för lokalisering och byggnation av djupförvaret, planerad till år 2007. Dessförinnan görs preliminära säkerhetsbedömningar baserade på data från det inledande platsundersökningskedet. I samband med detta kan lämpligen även metodutveckling vad gäller t ex scenarioanalyser, hantering av osäkerheter och riskberäkningar redovisas och delvis tillämpas, liksom nyvunnen kunskap vad gäller kapsel och buffert. Redovisningen utgör också grunden för den säkerhetsanalys som ska åtfölja ansökan om tillstånd för lokalisering och byggnation av inkapslingsanläggningen, planerad till år 2005. I senare skeden planeras analyser som ska utgöra underlag för ansökningar om tillstånd att ta förvaret i drift och tillstånd för förslutning. Förvarsdelen för annat långlivat avfall kommer enligt planerna att lokaliseras först omkring år 2035. Forskningsprogrammet för frågor relaterade till detta förvar redovisas i kapitel 18. En preliminär säkerhetsanalys har nyligen redovisats /2-5/. Då nästa säkerhetsanalys för djupförvaret är slutförd kan det vara lämpligt att göra en förnyad mer omfattande säkerhetsanalys för slutförvaret för långlivat avfall. Önskemål om

detta har framförts av SKI och SSI i deras gemensamma granskning av den preliminära säkerhetsanalysen /2-6/. Säkerhetsanalysen för slutförvaret för låg- och medelaktivt driftavfall, SFR-1, har nyligen förnyats /2-7/ och förnyade analyser planeras vart tionde år.

Detta kapitel beskriver SKB:s program för att vidareutveckla metodiken för analyser av långsiktig säkerhet för djupförvaret för använt kärnbränsle. Programmet bygger till stora delar på SKB:s erfarenheter från SR 97 samt på synpunkter från granskningarna av SR 97.

Kapitlets struktur är influerad av de moment som säkerhetsanalysen SR 97 delades in i, nämligen:

1. Systembeskrivning.
2. Beskrivning av initialt tillstånd.
3. Val av scenarier.
4. Analys av valda scenarier.
5. Utvärdering.

Formatet för systembeskrivningen diskuteras i avsnitt 2.2. Även en dokumentation av de processer som på lång sikt påverkar och förändrar förvaret ingår i moment 1. Forskningsprogrammet för processerna är omfattande och redovisas separat i kapitlen 3 till 10.

Frågor kring moment 2, initialtillståndet, tas upp helt i dessa kapitel. Programmet för momenten 3 och 4 redovisas i avsnitten 2.3 respektive 2.4. Moment 5 avser i första hand en diskussion av resultatet av analysen och är inte en direkt metodfråga. Detta behandlas därför inte här.

Metodfrågor relaterade till biosfären hanteras helt i kapitel 9. Det gäller t ex biosfärens roll i framtida analyser och mått på förvarets förmåga till hälso- och miljöskydd.

Där så är möjligt görs för olika delfrågor en systematisk genomgång med följande underrubriker:

- Slutsatser i SR 97 och dess granskning.
- Slutsatser i FUD-program 98 och dess granskning.
- Nyvunnen kunskap sedan FUD-program 98 och SR 97.
- Utvecklingsprogram.

En redogörelse för hur data från platsundersökningarna ska bearbetas och överföras till säkerhetsanalysen finns i avsnitt 13.3.

### **2.1.1 Metodrapport**

Resultatet av mycket av det arbete som skisseras i detta kapitel kommer att redovisas i en Metodrapport för de säkerhetsanalyser som ska baseras på data från platsundersökningarna. Rapporten ska bl a behandla:

- Format för systembeskrivningen och planerna för en moderniserad Processrapport.
- Scenariehantering.
- Metod för dataval till konsekvensanalyser.
- Metod för probabilistiska beräkningar, inklusive rollfördelning mellan analytiska och numeriska modeller.

- Naturliga analogiers roll i kommande analyser, se även kapitel 11.
- Möjligheter till återkoppling från säkerhetsanalysen till platsundersökningarna och förvarsutformningen.
- Program för kommande säkerhetsanalyser, inklusive eventuella delanalyser inför de omfattande analyser som ska baseras på data från platsundersökningarna.

Rapporten ska stå klar inför starten av de kommande analyserna. SKB överväger att låta internationell expertis granska rapporten.

## 2.2 Systembeskrivning

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

SR 97 beskriver förvarssystemet med s k THMC-diagram för förvarsdelarna bränsle, kapsel, buffert och geosfär. I diagrammen samlas de processer som långsiktigt förändrar förvaret samt de variabler som över tid beskriver förvaret. Den tillhörande Processrapporten /2-8/ sammanfattar kunskapen om processerna. I SR 97 drogs slutsatsen att metoden är användbar men också att den behöver vidareutvecklas.

Myndigheterna uttrycker en liknande syn vid granskningen av SR 97 och ger flera synpunkter på vad som behöver förbättras:

”Myndigheterna bedömer att de nyutvecklade THMC-diagrammen är ett bra komplement till tidigare utvecklade metoder för systembeskrivning och visualisering av processerna i slutförvaret. SKB bör dock utveckla metoden för att på ett bättre sätt kunna inkludera tidsberoende effekter och strukturella förändringar. SKB bör även fortsätta arbetet med att utveckla en systematisk beskrivning av processerna i biosfären.

SR 97 innehåller en systematisk genomgång av de processer och data som används i konsekvensanalysen för kapseldefektscenariot. Dokumentationen är ett stort framsteg, men SKB bör utveckla metodiken ytterligare främst med tanke på underbyggandet av motiv för att utesluta potentiellt ogynnsamma processer från konsekvensanalysen. Alternativt bör dessa processer inkluderas i beräkningarna så att riskbidragen kan utvärderas. Kolloidal transport av radionuklider och mikrobers påverkan på korrosion av kapseln är två exempel på sådana processer som identifierats i denna granskning.

Myndigheterna anser att SR 97 innehåller en förtjänstfull genomgång och beskrivning av de processer som kan påverka slutförvarets funktion och av de data som använts för beräkningarna av radionuklidtransport i kapseldefektscenariot. Inför framtida säkerhetsredovisningar som skall ligga till grund för tillståndsansökningar bör SKB dock utveckla mer väldefinierade och kvalitetssäkrade procedurer för dokumentation och genomförande av de expertbedömningar som ligger till grund för val av modeller, data och andra viktiga förutsättningar i säkerhetsanalysen. Myndigheterna vill också uppmana SKB att i större utsträckning låta utomstående experter granska de viktigaste underlagen och antagandena innan säkerhetsanalysen färdigställs.”

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Systembeskrivningen för SR 97 var inte färdig då FUD-program 98 skrevs och diskuterades därför inte i detalj.

## **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Se motsvarande rubrik i avsnitt 2.3.

## **Utvecklingsprogram**

En önskvärd, men svåruppnådd, egenskap hos en systembeskrivning är att den ska kunna beskriva den tidsberoende utvecklingen hos systemet för olika initial- och randförhållanden. Detta är t ex värdefullt vid valet av scenarier. Beskrivningen skulle inte behöva vara detaljerad utan fokusera på det som är väsentligt för den långsiktiga säkerheten, vilket ofta kan formuleras som att tillståndet i barriärerna måste hållas inom vissa gränser. Detta kan i sin tur anges som begränsningar hos de variabler som beskriver respektive barriär.

I THMC-diagrammen visas med pilar kvalitativt hur olika variabler styr en process som i sin tur ger en påverkan på andra variabler. Om metoden ska användas för att kvantitativt illustrera den tidsberoende utvecklingen måste dessa samband på ett eller annat sätt kvantifieras. En fullständig, kopplad modell som omfattar termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska aspekter för hela förvarssystemet i tid och rum torde ligga helt utanför det möjligas gräns. En sådan modell skulle också bli alltför komplex och svårhanterad för att vara till praktisk nytta i en säkerhetsanalys.

Däremot kan många delar av systemet modelleras i detalj, vilket också är ett nödvändigt inslag i en säkerhetsanalys. Många modelleringsresultat kan uttryckas med enkla empiriska samband mellan påverkande variabler å ena sidan och tidsberoende förändringar hos en eller flera påverkade variabler eller egenskaper å den andra. Om sådana förenklade samband kunde utarbetas för flertalet processer, skulle en förenklad form av tidsberoende, kopplad modell kunna sammanställas och sedan ge en grov bild av utvecklingen för olika scenarier. Också olika randförhållanden skulle då behöva kvantifieras. Systemets funktion skulle uttryckas som krav på att vissa värdeintervall över tiden innehålls för de olika barriärerna, t ex koppelhöljets tjocklek eller buffertens densitet.

Möjligheterna att genomföra allt detta kommer att studeras. Uppgiften är omfattande och framkomligheten svårbedömd. Någon form av förstudie blir därför nödvändig. Om metoden fungerar skulle en av de ursprungliga avsikterna med THMC-beskrivningen med dess strikta åtskillnad mellan systemdelar, variabler och processer, vara genomförd och verktyget bedöms då bli mycket användbart i en säkerhetsanalys, inte bara för att som idag ge en struktur för analysen utan även för att beskriva systemets utveckling. Om metoden visar sig användbar kommer den sannolikt att behöva utvecklas och förfinas under lång tid.

Systembeskrivningen behöver i alla händelser även utvecklas på en rad andra punkter. Följande utvecklingsbehov noterades i SR 97 rapporten:

- Lagring av systembeskrivning med tillhörande processdokumentation på elektroniskt medium, kopplat till befintliga databaser.
- En revision av processvalet baserat på tillgängliga databaser.
- Kompletteringar av processdokumentationen där ny kunskap tillkommit.



Av bl a myndigheternas kommentarer till SR 97 är det uppenbart att rutiner för och dokumentationen av flera steg i säkerhetsanalysen behöver förbättras eller tydligare redovisas, vilket lämpligen görs inför och i en kommande version av Processrapporten:

- En tydligare motivering till att utesluta potentiellt ogynnsamma processer.
- En bättre beskrivning av hur olika processer hanteras i modeller.
- Dokumenterade val av experter för att uppdatera delavsnitt i Processrapport.
- Rutiner för hur osäkerheter ska beskrivas.
- Rutiner för intern granskning.

Formatet för den utvecklade systembeskrivningen, inklusive formatet för en ny Processrapport kommer att ges i den Metodrapport som omnämndes i avsnitt 2.1.1.

Det kan också påpekas att detta forskningsprogram, FUD 2001, liksom resultatet av dess myndighetsgranskning, i sig utgör ett steg i revisionen av systembeskrivningen och Processrapporten.

Slutligen måste frågan om huruvida alla väsentliga processer och kopplingar har identifierats ständigt hållas levande, bl a genom kritisk granskning av systembeskrivningen och diskussioner med expertis såväl nationellt som internationellt.

## **2.3 Scenarieval**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 baseras valet av scenarier i stor utsträckning på tidigare arbeten och erfarenheter. Där konstateras också att kommande arbete bör inkludera "ett mer systematiskt scenarieval baserat på formatet för systembeskrivningen och tillgängliga FEP-databaser".

Från utvärderingen av SR 97 noteras:

"Myndigheterna anser att de scenarier som utvärderats i SR 97 ger en acceptabel täckning av de inre och yttre störningar som kan tänkas påverka slutförvarets skyddsförmåga. Vid det fortsatta arbetet med scenarier behöver dock SKB tillgodose att dessa ger en bra utgångspunkt för, och är logiskt kopplade till, både systembeskrivningen och riskberäkningarna. En brist i SR 97 är att kopplingar mellan olika störningar inte är tillräckligt analyserade. Till exempel har SKB inte tillräckligt belyst vilken påverkan framtida klimatförändringar kan ha på de tekniska barriärerna, på transport av radionuklider samt hur frekvens och magnitud på jordskalv kan påverka slutförvarets skyddsförmåga. Myndigheterna anser att SKB bör överväga att analysera mer heltäckande scenarier som på ett mer integrerat sätt hanterar händelser och processer som kan påverka förvarets säkerhet. SKB bör också genomföra en mer omfattande analys av scenarioosäkerheter, t ex alternativa klimatutvecklingar och alternativa defekter i de tekniska barriärerna."

SKB diskuterade i SR 97 scenarier baserade på mänskliga handlingar. Myndigheterna konstaterade i sin granskning att "SKB:s analys bedöms vara tillfyllest från de utgångspunkter som gäller idag".

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Någon slutlig metod för scenarieval beskrevs inte i FUD-program 98. Myndigheterna gav därför endast allmänna kommentarer.

## **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

SKB har deltagit i en internationell workshop i regi av OECD/NEA med syftet att utvärdera metoder för scenariehantering i säkerhetsanalyser. Två huvudsakliga kvarstående svårigheter som framhålls i rapporten från mötet /2-9/ är beskrivningen av tidsberoenden samt problemet att klart och spårbart dokumentera det tekniska underlaget och resultatet av scenariehantering. Båda dessa problem har påpekats tidigare.

## **Utvecklingsprogram**

Inför kommande säkerhetsanalyser som ska baseras på data från platsundersökningar behövs en förbättrad metod för val av scenarier. Samtidigt konstaterar både SKB och myndigheterna att scenariovalet i SR 97 ger en acceptabel täckning av förvarets tänkbara utvecklingsvägar. Olika metoder som historiskt använts för scenariovalet av SKB och andra har givit uppsättningar som liknar den i SR 97. Inte heller den metodutveckling som skisseras nedan förväntas leda till stora förändringar av scenarioupsättningen.

Ett systematiskt scenarioval kan göras direkt med tillgängliga THMC-diagram. Om den utveckling av tidsberoende samband för diagrammen som skisseras i avsnitt 2.2 blir framgångsrik bedöms detta bli ytterligare ett verktyg för scenariovalet. Systemets utveckling och funktion skulle då kunna studeras översiktligt för rader av initial- och randförhållanden inom ramen för den tidsberoende modellens giltighet. Valet av scenarier skulle därmed kunna systematiseras grundligare än hittills.

En annan, mer kvalitativ metod för scenarieval utgör den sk morfologiska analys som användes för att definiera mänskligt orsakade scenarier i SR 97. Metoden var användbar i den tillämpningen och skulle kunna vara mer generellt användbar.

Dessutom har flera organisationer i andra länder utvecklat och publicerat metoder för scenariehantering /2-9/ som till del skulle kunna vara användbara för SKB, liksom en genomgång av de scenarier som faktiskt valts i andra analyser.

En mer systematisk genomgång än den i SR 97 av initialtillståndet med vidhängande osäkerheter kommer att genomföras inför valet av scenarier i kommande analyser. Scenariovalet kan därigenom komma att bli beroende av platsens speciella förhållanden.

De olika angreppssätt som skisserats ovan behöver provas och utvärderas innan en metod för scenarieval i kommande säkerhetsanalyser kan läggas fast.

I SR 97 hanterades jordskalv i ett eget scenario och resonemang fördes därefter om kopplingar till exempelvis klimatscenariot. Anledningen till att separera jordskalv från övriga scenarier var delvis praktisk, eftersom en modellutveckling pågick för jordskalvsberäkningar. I kommande analyser är avsikten att integrera jordskalv platsspecifikt i samtliga relevanta scenarier.

SKB avser att fortsätta arbetet med scenarier baserade på mänskliga handlingar, bl a i internationella fora samt i dialog med myndigheterna vad gäller redovisningsformerna.

Scenariemetodiken i framtida analyser kommer att beskrivas i Metodrapporten, se avsnitt 2.1.1.

## **2.4 Analys av valda scenarier**

Under denna rubrik ryms huvuddelen av redovisningen i SR 97, och därmed även huvuddelen av myndigheternas kommentarer i granskningsrapporten. Stora delar av redovisningen och kommentarerna rör enskilda processer, modeller eller data och behandlas därför i kapitel 4 till 11. Andra delar rör konkreta val av beräkningsfall och presentationsformer, vilket kan tas om hand först i en förnyad säkerhetsanalys eller i den Metodrapport som planeras inför kommande analyser, se avsnitt 2.1.1.

Nedan behandlas några punkter som generellt rör dels modeller och data, dels riskanalyser och beräkningar.

### **2.4.1 Data och modeller**

Från granskningen av SR 97 noteras:

”Myndigheterna bedömer att SKB inför genomförandet av SR 97 har tagit fram en allsidig uppsättning av modeller och data för säkerhetsanalysens behov. Dokumentation och motivering av modeller behöver dock förbättras i kommande säkerhetsanalyser. Utvärderingen av alternativa hydrogeologimodeller i SR 97 är ett värdefullt initiativ för att förstå modellbegränsningar och konceptuella osäkerheter. Ett liknande angreppssätt borde övervägas även för andra delar av modellkedjan, som t ex utvecklingen av närområdet och radionuklidtransport.”

”Myndigheterna finner framtagandet av Processrapporten vara ett lovvärt initiativ att dokumentera den vetenskapliga förståelsen för de underliggande processerna i modellerna. I kommande säkerhetsanalyser bör dock SKB bli tydligare med att redovisa hur processbeskrivningarna utnyttjas i valet av konceptuella modeller.”

”Myndigheterna bedömer att den s k Datarapporten (där SKB:s val av data till kapseldefektscenariot motiveras) generellt innehåller en bra diskussion om det vetenskapliga underlaget för val av värden av olika parametrar. Myndigheterna anser dock att SKB bör använda sig av mera väldefinierade och kvalitetssäkrade procedurer för val av data, eftersom det i SR 97 oftast inte framkommer hur bedömningarna genomförts samt vilka experter som varit inblandade... Myndigheterna vill också uppmana SKB att inför kommande redovisningar komplettera Datarapporten med data som erfordras för analyser i andra scenarier än kapseldefektscenariot.”

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKB:s redovisning och SKI:s kommentarer rör nästan uteslutande enskilda modeller, och behandlas därför i kapitel 4 till 10.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

För utveckling av enskilda modeller, se kapitlen 4 till 10.

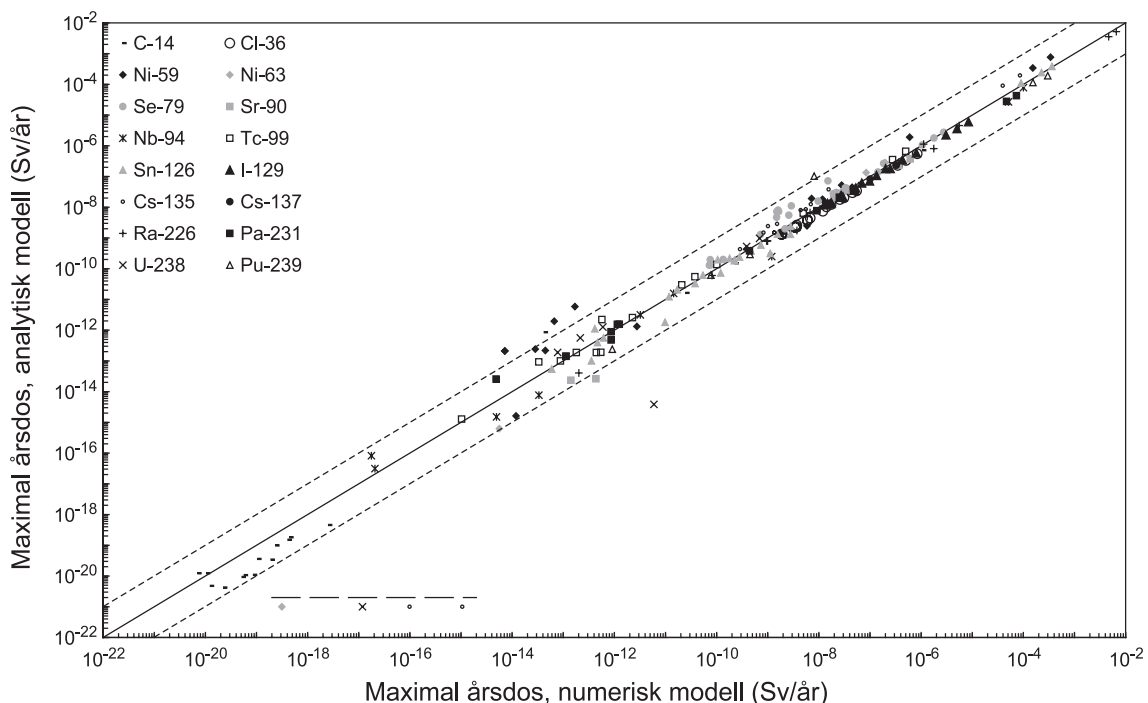
I SR 97 jämfördes resultaten av numeriska beräkningar av radionuklidtransport i hela förvarssystemet med resultat från preliminära, enkla analytiska modeller. Arbetet har drivits vidare och idag kan alla väsentliga delar av de numeriska resultaten i SR 97 återskapas med de analytiska modellerna.

Syftena med att utveckla analytiska modeller är bl a att:

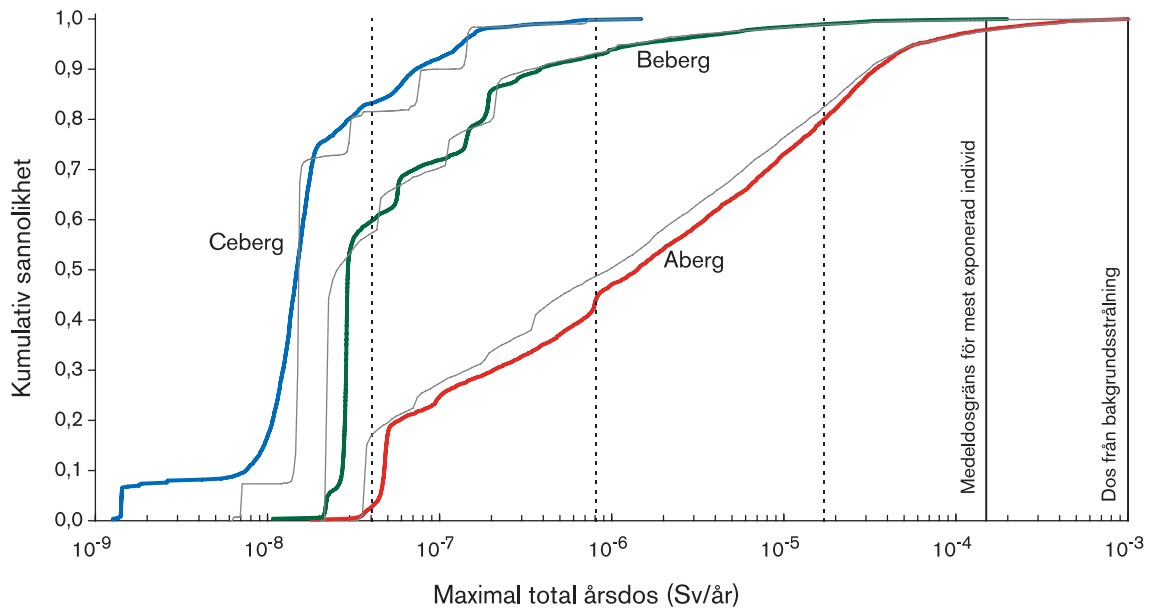
- Möjliggöra snabba preliminära probabilistiska beräkningar.
- Förbättra förståelsen av transportfenomen i kapsel, buffert och berg.
- Snabbt och enkelt sätta fokus på dominerande nuklider och de viktigaste parametrarna i transportmodellerna.
- Validera och verifiera de numeriska modellerna.
- Ge flera aktörer, bl a myndigheterna, tillgång till ett verktyg som inte kräver specialutbildning i användargränssnitt, användning av stordatorer etc.

Den matematiska härledningen av den analytiska modellen inklusive jämförelser med numeriska resultat i SR 97 beskrivs i /2-10/.

Resultat för transportmodellen för närområdet redovisas i avsnitt 7.3, för geosfären i avsnitt 8.2.28. Figur 2-1 visar maximala årsdoser i tidsintervallet upp till en miljon år efter förslutning beräknade med numeriska och analytiska modeller. Figuren omfattar samtliga osäkerhetsfall i SR 97 /2-11/ och dessutom fall där alla parametrar samtidigt ges alltigenom rimliga eller alltigenom pessimistiska värden. I de flesta fall ligger avvikelserna inom en faktor tio. Avvikelse är generellt mindre för högre doser än för lägre; för doser över  $10^{-8}$  Sv/år ligger avvikelserna inom en faktor tre. Om man i stället jämför maximal total dos, dvs maximala summadosen från alla nuklider i ett beräkningsfall över en miljon år, ligger samtliga avvikelser inom en faktor 1,4. Eftersom detta är den kvantitet som beräknas i de probabilistiska dosberäkningarna, kan man förvänta att också probabilistiska resultat blir snarlika med de två modelluppsättningarna.



**Figur 2-1.** Jämförelse av maximala årsdoser för de tre platserna i SR 97 och de 16 viktigaste nukliderna i SR 97, beräknade med numeriska och analytiska modeller. Figuren visar resultaten av nio olika beräkningsfall för var och en av de tre platserna och förklaras ytterligare i /2-10/.



**Figur 2-2.** Probabilistiska resultat för de tre platserna i SR 97, beräknade med numeriska (tjocka linjer) och analytiska (tunna linjer) modeller. De streckade, vertikala linjerna visar fördelningarnas medelvärden för de tre platserna (nästan identiska resultat med de två modellerna).

Detta bekräftas i figur 2-2 där de probabilistiska resultaten för en torvmosse från SR 97 återskapats med den analytiska modellen. Beräkningstiderna i det probabilistiska fallet var cirka tre veckor med dubbla SUN Ultra SPARC II processorer för de numeriska modellerna medan motsvarande analytiska beräkning krävde mindre än en timme med en ordinär 450 MHz kontors-PC. De analytiska beräkningarna gjordes med kommersiellt tillgänglig mjukvara. Båda beräkningarna använder resultaten av omfattande hydroberäkningar för de tre platserna, något som inte bedöms möjligt att återskapa med en enkel analytisk modell.

Resultaten visar att den analytiska modellen bör vara användbar för de syften som formulerades ovan. Data till modelljämförelserna täcker tre olika platser och relativt breda osäkerhetsintervall för såväl närområde som geosfär. Det är därför rimligt att förvänta att också numeriska resultat från kommande analyser baserade på data från platsundersökningar kan återskapas med den analytiska modellen. Detta förutsätter dock att den grundläggande förståelsen av transportfenomen och hur dessa representeras i den numeriska modellen inte förändras.

Det är inte SKB:s avsikt att använda de analytiska approximationerna som ett huvudinstrument i kommande analyser. Approximationernas giltighetsområden måste bestämmas genom jämförelser med numeriska modeller i varje säkerhetsanalys och modellen bör därefter kunna användas för de skisserade syftena. De numeriska modellerna kommer alltid att utgöra "rättesnöret" och vara det viktigaste beräkningsverktyget för radionuklidtransport; dessa måste underhållas och utvecklas med full kraft även framgent.

## **Utvecklingsprogram**

För utvecklingen av enskilda modeller, se kapitel 4 till 10.

Vad gäller dokumentationen av val av konceptuella modeller planeras dels en mer explicit beskrivning i Processrapporten av hur olika processer tas om hand i de modeller som används i säkerhetsanalysen, dels särskilda validitetsdokument för de viktigaste modellerna för konsekvensberäkningar, dvs modellerna för grundvattenflöden i geosfären samt för radionuklidtransport i närområde, geosfär och biosfär.

Datarapporten ska i kommande versioner utvidgas till att dels gälla indata till fler modeller än de för grundvattenflöde och radionuklidtransport, dels fler scenarier. Den ska också utvecklas till att omfatta probabilistiska data för åtminstone de parametrar som ger de dominerande osäkerheterna i riskberäkningen, se avsnitt 2.4.2. Metodiken för att hantera expertval av data i SR 97, i korthet genom instruktioner till delförfattare och sedan sammanvägd expertbedömning vid SKB, kommer att förtydligas och vid behov utvecklas.

Planerna för detta, liksom för hur data ska kvalitetssäkras i kommande analyser kommer att preciseras i Metodrapporten, se avsnitt 2.1.1.

Resultaten av de utvidgade probabilistiska beräkningarna finns som ett konferensbidrag /2-12/ och avsikten är att senare utvidga studien och publicera resultaten i en internationell vetenskaplig tidskrift. Fler resultat behöver jämföras med resultat från numeriska modeller. Överföring av modellen till annan mjukvara behöver övervägas. Modellernas roll i kommande säkerhetsanalyser behöver fastläggas. Detta görs lämpligen i Metodrapporten, se avsnitt 2.1.1.

### **2.4.2 Riskanalyser och beräkningar**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 användes en förenklad metod för riskberäkningar och det konstaterades att metoden behöver utvärderas och utvecklas.

Från granskningen av SR 97 noteras:

”Myndigheterna bedömer att SKB i kapseldefektscenariot har tagit fram en uppsättning av beräkningsfall som på ett rimligt sätt beskriver hur förvarets olika barriärfunktioner samverkar samt illustrerar möjliga konsekvenser av läckage från en defekt kapsel. Osäkerhets- och känslighetsanalyserna bör dock kunna utvecklas betydligt, t ex genom att innefatta variationer av fler än en parameter eller parametergrupp åt gången samt hypotetiska beräkningsexempel som testar individuella barriärfunktioner hårdare.

Enligt myndigheternas uppfattning utgör riskberäkningarna i SR 97 ett första steg i anpassningen till användandet att ett riskkriterium. SKB bör dock ta fram en mindre godtycklig metod för att representera sannolikheter för de många parametrarna som ingår i riskanalysen. Korrelationer mellan olika parametrar i riskanalysen bör även studeras mera detaljerat, eftersom dessa skulle kunna ha stor påverkan på slutresultatet. Myndigheterna saknar också den särskilda redovisning av slutförvarets skyddsförmåga för det korta tidsperspektivet (0–1 000 år efter förslutning) som anges i SSI:s föreskrifter för slutligt omhändertagande.”

”Myndigheterna anser att SKB bör vidareutveckla sin metod för val av data till riskberäkningarna, bl a därför att SKB inte visat att de bimodala fördelningarna, med

en sannolikhet på 0,9 och 0,1 för rimliga respektive pessimistiska värden, är ett försiktigt val. Myndigheterna håller också med de externa granskarna om att det finns ett mått av godtycklighet i SKB:s sätt att representera en parameter och dess tillhörande osäkerhet med de bimodala fördelningarna, vilket gör att analysen kan bli svårbedömd och ha en oklar statistisk innebörd.”

### Slutsatser i FUD 98 och dess granskning

Detta avsnitt handlar om de specifika riskanalyser och beräkningar som presenterades i SR 97 och ämnet avhandlas således inte i FUD-program 98.

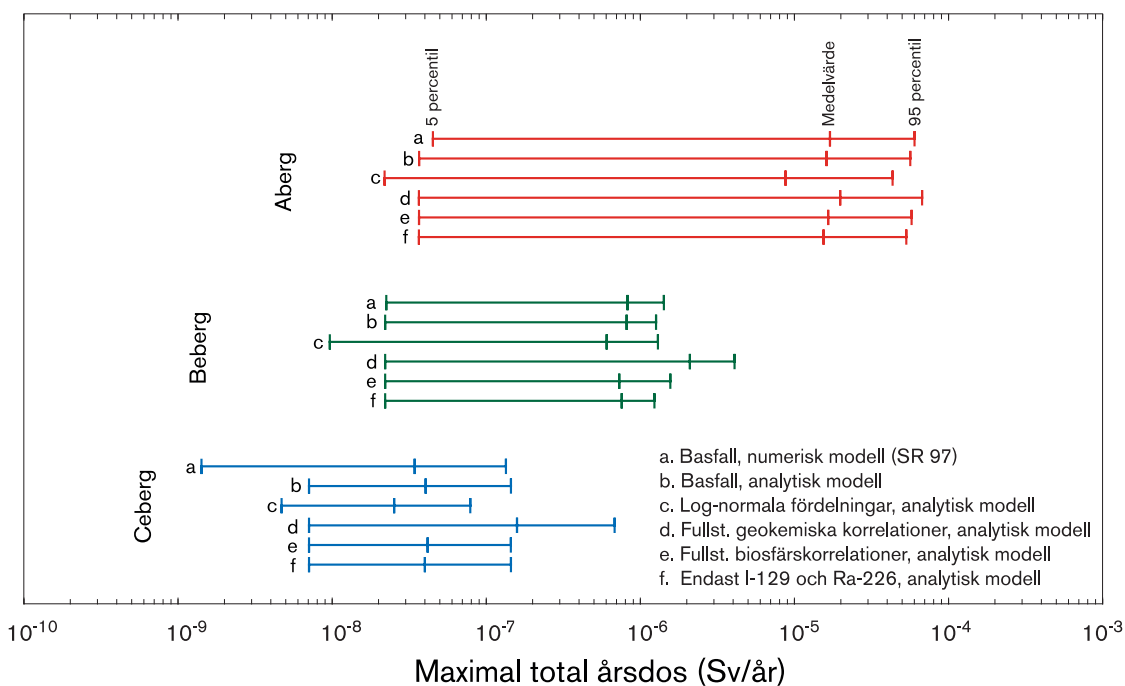
### Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97

Med hjälp av de nyutvecklade analytiska modellerna har känsligheterna hos resultatet av riskberäkningarna i SR 97 utretts vad gäller:

- Korrelationer mellan indata.
- Detaljer hos de antagna fördelningarna.
- Varianter i hydromodelleringen vid Aberg, Beberg och Ceberg.
- Risk som funktion av tid.

Dessutom har de förenklade osäkerhetsanalyserna i SR 97 kompletterats med en rangkorrelationsanalys, en etablerad metod för ändamålet. Vissa av resultaten finns i /2-12/.

Figur 2-3 visar hur den beräknade riskfördelningen påverkas av antaganden om detaljer hos indatafördelningarna. I basfallet, dvs den riskberäkning som redovisades i SR 97, är huvuddelen av fördelningarna bimodala med sannolikheterna 0,9 och 0,1 för rimliga respektive pessimistiska värden. Vattentransporttid och grundvattenflöde på försvarsnivå utgör undantag där framräknade, korrelerade fördelningar hämtades från resultaten av hydroberäkningar med HYDRASTAR. I figur 2-4 visas hur medelvärde samt 5- och 95-



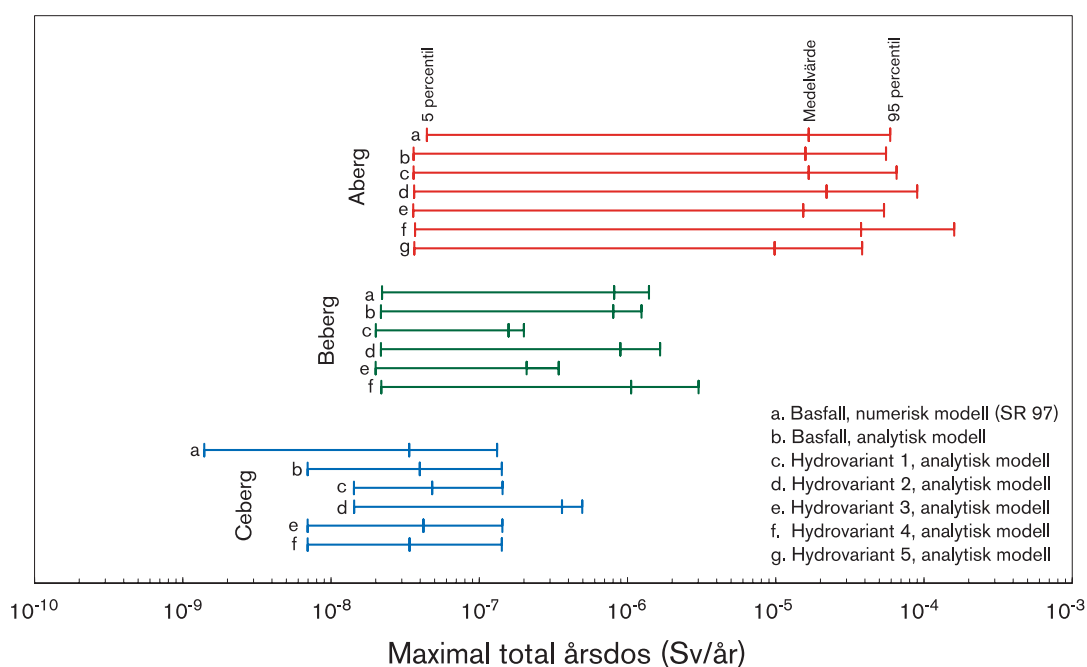
**Figur 2-3.** Resultat av probabilistiska beräkningar med alternativa fördelningar och korrelationer.

percentil hos den resulterande riskfördelningen påverkas av att byta de bimodala fördelningarna mot log-normala med oförändrade medelvärden och varianser. Förändringarna i de resulterande fördelningarna är odramatiska, vilket är tillfredsställande eftersom kunskapen om detaljerna i fördelningar av detta slag alltid kommer att vara bristfällig.

Figur 2-3 visar också hur den beräknade riskfördelningen påverkas av antaganden om korrelationer mellan indata. I basfallet, dvs den riskberäkning som redovisades i SR 97, är samtliga data okorrelerade, med undantag av vattentransporttid och grundvattenflöde på förvarsnivå där par av korrelerade värden tas från resultaten av hydroberäkningar med HYDRASTAR. I figur 2-3 visas hur medelvärde samt 5- och 95-percentil påverkas av först antagandet att alla parametrar korrelerade till de geokemiska förhållandena (lösligheter, samt sorptions- och diffusivitetsdata i buffert, återfyllning och geosfär) samtidigt ges antingen rimliga (sannolikhet 0,9) eller pessimistiska (sannolikhet 0,1) värden. Det är uppenbart att också denna fullständiga korrelation ger en begränsad påverkan på resultatet. I ett andra exempel varierades basfallet genom att biosfäromvandlingsfaktorerna för samtliga nuklider samtidigt gavs antingen rimliga eller pessimistiska värden. En sådan korrelation, om än inte fullständig, bör finnas eftersom flera förhållanden i biosfären påverkar alla nuklider på ett liknande sätt. Det gäller t ex arean hos den torvmosse beräkningarna gäller. Inte heller i detta fall gav ens en fullständig korrelation några avgörande effekter på resultatet. Resultaten av dessa exempel är tillfredsställande eftersom korrelationer kan vara svåra att kvantifiera.

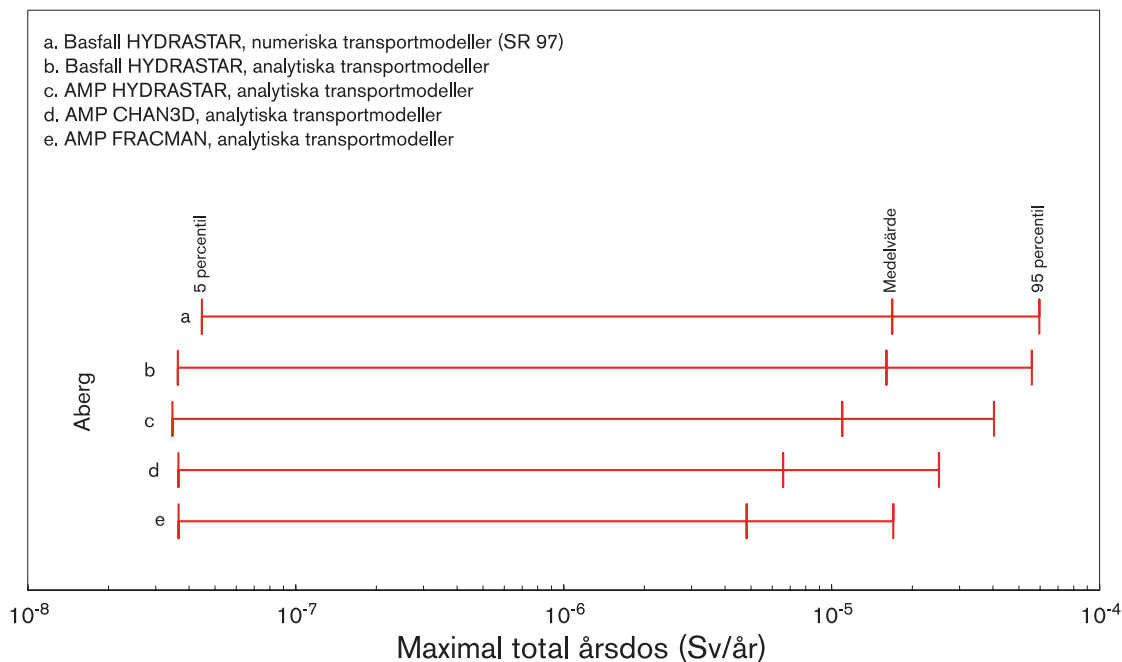
Den nedersta dosfördelningen för respektive plats i figur 2-3 är beräknad med endast I-129 och Ra-226. Eftersom dessa fördelningar är i det närmaste identiska med basfallet är det uppenbart att dessa båda nuklider helt dominerar den totala dosen då biosfären antas vara en torvmosse. För Ceberg bidrar i själva verket endast I-129.

I figur 2-4 visas egenskaper hos dosfördelningar framräknade med alla de varianter som analyserades vid hydromodelleringen med HYDRASTAR för de tre platserna, se figurerna 9-15, 9-18 och 9-20 i SR 97 Huvudrapport del II. Det är uppenbart att spridningen hos basfallet (eller hos någon av varianterna) är betydligt större än skillnaderna mellan varianterna. (I SR 97 gjordes konsekvensberäkningarna bara för de tre basfallen.)



**Figur 2-4.** Resultat av probabilistiska dosfördelningar där samtliga varianter av den stokastiska kontinuummodellen för Aberg, Beberg och Ceberg i SR 97 använts.



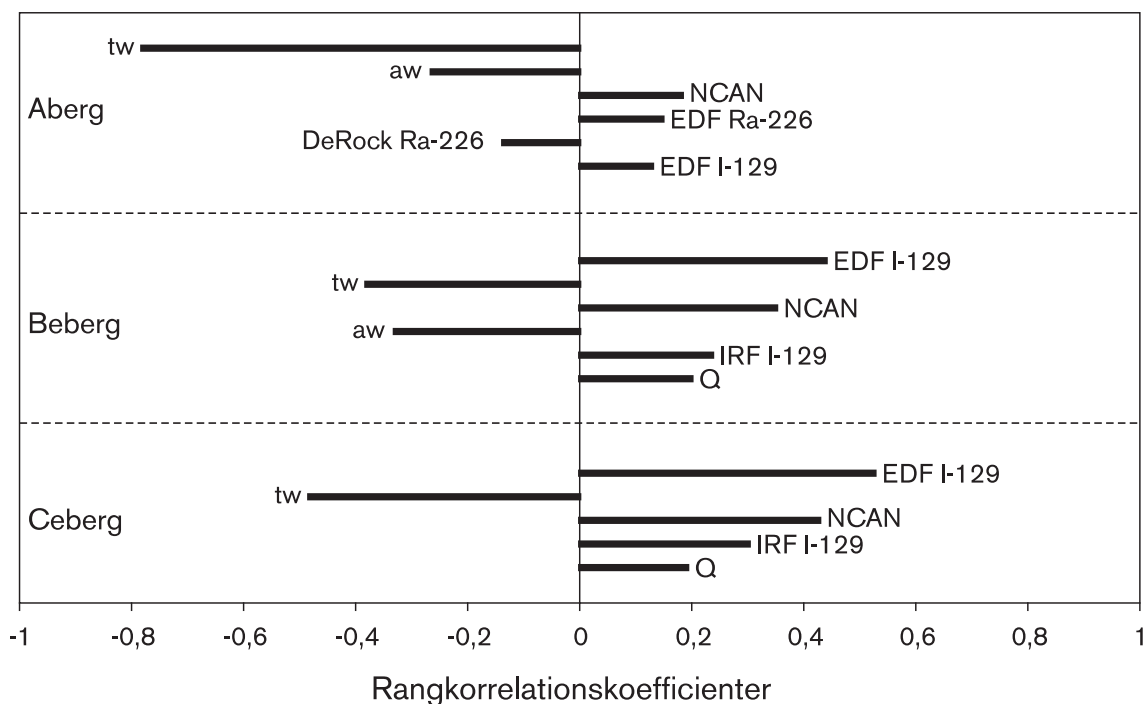


**Figur 2-5.** Resultat av probabilistiska dosfördelningar genomförda med hydrodata från tre olika konceptuella modeller för Aberg, Beberg och Ceberg.

Figur 2-5 visar dosfördelningar beräknade med hydrodata från tre olika konceptuella modeller för Aberg i SR 97, se avsnitt 9.8.4 i SR 97 Huvudrapport del II. Av figuren framgår att skillnaderna mellan fördelningarna är betydligt mindre än spridningen inom en fördelning. Därmed har samtliga konceptuella hydromodeller använts i konsekvensanalysen, vilket förordades i bl a den internationella granskningen av SR 97.

Osäkerhetsanalyserna i SR 97 genomfördes som ett antal variationsfall där en eller ett fåtal parametrar åt gången varierades. En vedertagen metod för osäkerhetsanalyser är att, baserat på resultat från en probabilistisk beräkning, bestämma  $s_k$  rangkorrelationer för de inblandade parametrarna /2-13/. Rangkorrelationen är ett mått på i vilken utsträckning osäkerheten i respektive parameter är relaterad till osäkerheten i beräkningsresultatet (spridningen hos dosfördelningen). Figur 2-6 visar rangkorrelationer beräknade med hjälp av resultaten från riskberäkningen med den analytiska modellen för Aberg, Beberg och Ceberg. Resultaten bekräftar bilden från de enkla osäkerhetsanalyserna i SR 97, nämligen att osäkerheter/variabilitet hos vattentransporttid  $t_w$ , flödesvätt yta,  $a_w$ , antalet trasiga kapslar, NCAN, och biosfärsomvandlingsfaktorer, EDF, ger de största bidragen till osäkerheten i den resulterande dosfördelningen. Metoden hade lika gärna kunnat tillämpas på resultaten från de numeriska beräkningarna i SR 97.

De analytiska modellerna bedöms vara ett värdefullt hjälpmedel för att illustrera betydelsen av olika aspekter av riskberäkningarna i säkerhetsanalysen. Resultaten ovan indikerar att stora resurser inte bör ägnas åt att söka fastlägga detaljer i antagna fördelningar till en probabilistisk beräkning eller till att kvantifiera korrelationer mellan olika indata till beräkningarna, åtminstone inte för de parameterrelationer som utretts här. Dessutom kan den generella slutsatsen i SR 97, att den naturliga variabiliteten i hydroförhållanden vid en plats ger en större spridning i beräkningsresultatet än de konceptuella osäkerheter som täcks av hydrovarianterna, utvidgas till att också omfatta resultat av dosberäkningar. Även värderingen av vilka parameterosäkerheter som ger de största bidragen till spridningen hos den beräknade riskkurvan bekräftas av beräkningen med den mer sofistikerade metoden ovan.



**Figur 2-6.** Rangkorrelationskoefficienter för Aberg, Beberg och Ceberg.

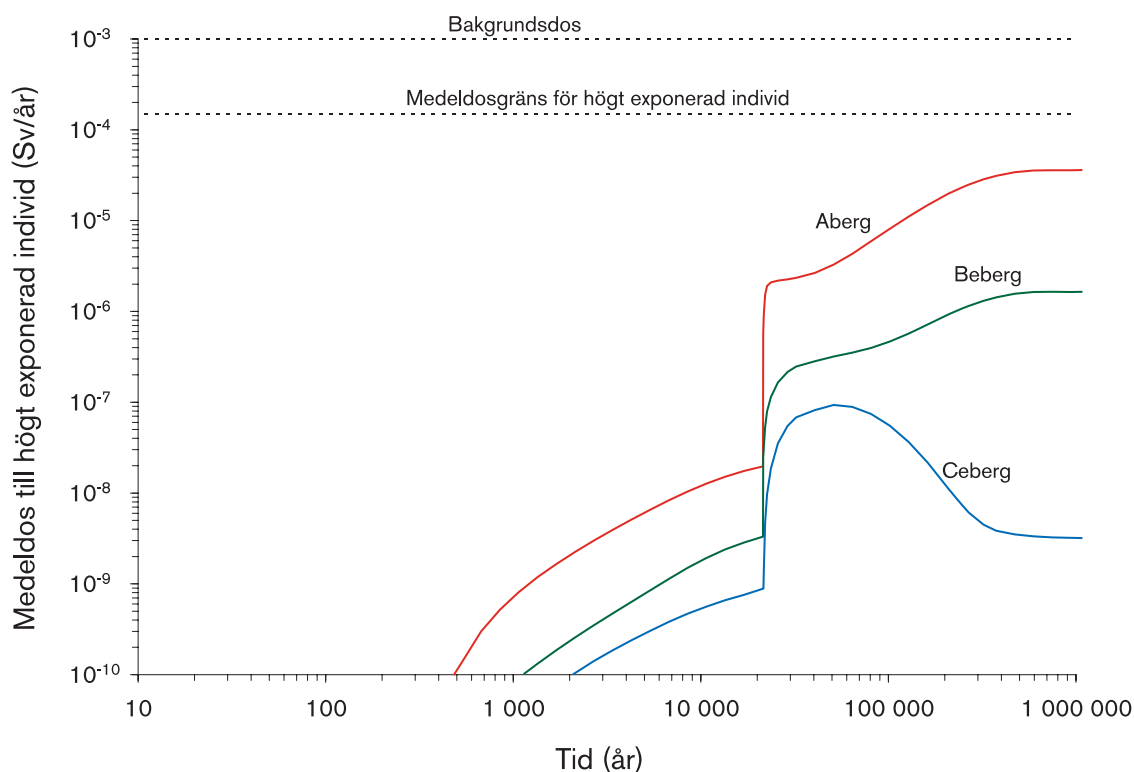
I figur 2-7 slutligen har den analytiska modellen använts till att beräkna risk (uttryckt som medeldos) som funktion av tid för de tre platserna i SR 97, något som efterlystes i bl a den internationella granskningen. SSI har i senare diskussioner förklarat detta vara den kvantitet man förväntar sig i kommande redovisningar, snarare än det riskmått baserat på den maximala dosen i tidsintervallet upp till en miljon år efter förslutning som användes i SR 97. Figuren visar medeldosen som funktion av tid, beräknad med samma fördelningar hos indata som i SR 97.

### **Forskningsprogram**

Flera frågor kring probabilistiska riskberäkningar behöver utredas ytterligare. Den analytiska modellen har visat sig användbar i flera avseenden, men de viktigaste resultaten ovan behöver bekräftas med de numeriska modellerna för radionuklidtransport.

Resultaten ovan antyder att formen hos de antagna fördelningarna inte är av avgörande betydelse; också så enkla former som bimodala fördelningar bör kunna användas för att illustrera förvarets säkerhet, även om detta inte är SKB:s uttalade avsikt för kommande analyser. Däremot måste stor uppmärksamhet ägnas centralvärden och spridningsmått för fördelningarna. I SR 97 användes något schablonmässigt rimliga och pessimistiska värden med sannolikheterna 0,9 respektive 0,1. Detta behöver i kommande analyser ersättas av mer rigoröst framtagna centralvärden och spridningsmått, särskilt för de parametrar som har betydelse för spridning hos den framräknade dosfördelningen. Dokumentationen görs i den framtida motsvarigheten till Datarapporten i SR 97, se vidare avsnitt 2.4.1.

I den planerade Metodrapporten, avsnitt 2.1.1, kommer en strategi för både ickeprobabilistiska och probabilistiska beräkningar i kommande säkerhetsanalyser att presenteras, liksom hur data till dessa ska fastställas.



*Figur 2-7. Medeldos som funktion av tid vid Aberg, Beberg och Ceberg.*

Uppskattningar av osäkerheter i indata enligt givna rutiner ingår i många aktiviteter som föregår en säkerhetsanalys, exempelvis vid utvecklingen av de platsspecifika modellerna, se avsnitt 13.3.

SKB:s hanteringssystem för probabilistiska beräkningar, PROPER, kommer att vidareutvecklas, bl a så att risk kan beräknas som funktion av tid i kommande analyser. Till PROPER hör också ett grafiskt användargränssnitt kallat Monitor2000. Gränssnittet har visat sig krävande att underhålla och givit måttliga effektivitetsvinster vid genomförandet av beräkningar. Inte heller för dokumentation av beräkningar har Monitor2000 varit avgjort bättre än den interna dokumentation PROPER producerar. De nya analytiska modellerna erbjuder dessutom en kraftfull metod att med ett helt oberoende system kontrollera resultatet av PROPER-beräkningar. SKB avser därför att frysa utvecklingen av Monitor2000 under en övergångsperiod för att sedan eventuellt fatta beslut om en avveckling. Utvecklingen av de enskilda modeller som används i PROPER beskrivs i avsnitten 7.3 (närområdet) och 8.2.28 (geosfären).



### 3 Forskning kring långsiktig säkerhet

En betydande del av SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration rör de processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar för använt bränsle. I den nyligen genomförda säkerhetsanalysen SR 97 dokumenterades kunskapen om alla kända långsiktiga processer i en särskild Processrapport. Rapporten behandlade processer för i tur och ordning bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. Osäkerheter kring varje process och osäkerheternas betydelse för den långsiktiga säkerheten diskuteras i Processrapporten. Detta görs även i Huvudrapporten SR 97 där processernas samlade effekter på förvarets långsiktiga säkerhet utreds för ett antal scenarier.

De kommande kapitlen behandlar forskningsprogrammet för samtliga processer i Processrapporten, med utgångspunkt i osäkerhetsdiskussionerna i SR 97 liksom i de synpunkter SKI, SSI och den internationella granskningsgruppen hade på redovisningen i SR 97. Även SKB:s redovisning i FUD-program 98 och granskningsutlåtandet över den rapporten tas upp där så är relevant. Redovisningsformen knyter alltså resultatet av säkerhetsanalysen till utformningen av forskningsprogrammet, även om många av slutsatserna är möjliga att dra utan en fullständig säkerhetsanalys. Upplägget är också i linje med den internationella granskningsgruppens synpunkt att SKB bör ”förstärka säkerhetsanalysens roll för integrering av olika delar av slutförvarsprogrammet”. Även de svenska myndigheterna har i granskningen av SR 97 och tidigare efterlyst redovisningar av kopplingar mellan resultatet av säkerhetsanalyser och SKB:s forskningsprogram.

Genom att samtliga kända processer behandlas på ett likartat sätt blir redovisningen med nödvändighet ”katalogmässig” där stora och små frågor blandas. För att förmedla huvudragen i forskningsprogrammet med utgångspunkt i behoven för den långsiktiga säkerheten ges därför i detta kapitel en överblick av de väsentligaste frågorna att belysa under den kommande perioden.

I kapitel 4 till 8 följer detaljerade redovisningar av programmen för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning och geosfär. För varje förvarsdel 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, oavsett var de är placerade i förvaret och därmed oavsett när de kommer in i den successiva utbyggnaden av förvaret. Det blir därför naturligt att använda deponeringstidpunkten som initial tidpunkt för beskrivningen av bränsle, kapsel, buffert och återfyllning. Andra analyser rör förvaret som helhet. Här finns stora skillnader mellan olika delar av förvaret på grund av den successiva utbyggnaden. Problemet med att finna en starttidpunkt förenklas dock av att flera väsentliga variabler i geosfären, t ex sprickgeometrin, inte förändras nämnvärt under denna tid. För geosfären är det inte bara det initiala tillståndet omedelbart efter utbyggnad som är av vikt att beskriva. Det naturliga tillstånd som rådde före förvarsutbyggnaden är ofta av större intresse för den långsiktiga säkerheten, eftersom förhållandena vad gäller t ex grundvattenflöde och grundvattensammansättning kan förväntas återgå till de naturliga någon tid efter att förvaret förslutits. Detta diskuteras även i avsnitt 8.1.

Efter diskussionen om forsknings- och utvecklingsbehov för initialtillståndet behandlas samtliga processer i Processrapporten. Processerna är indelade i strålrelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C) samt processer relaterade till radionuklidtransport. I vissa fall är en behandling av enskilda processer inte tillräckligt för att förstå utvecklingen. Därför har processuppsättningen ibland kompletterats med beskrivningar som rubriceras som integrerade studier. Det gäller t ex en skadad kapsels hydro-mekanisk-kemiska (HMC) utveckling och den termo-hydro-mekaniska (THM) utvecklingen för en omättad buffert. Så långt möjligt används i varje avsnitt underrubrikerna:

- Slutsatser i SR 97 och dess granskning.
- Slutsatser i FUD-program 98 och dess granskning.
- Nyvunnen kunskap sedan FUD-program 98 och SR 97.
- Forskningsprogram.

Biosfären, som inte behandlas i Processrapporten, redovisas därefter i kapitel 9 med ett friare format än övriga delar. Slutligen redovisas kunskapslägen och forskningsprogram för klimatutveckling samt naturliga analogier i kapitel 10 respektive 11.

Tabell 3-1 visar alla processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten som behandlas i kapitel 4 till 8. Färgkoden ger en grov uppfattning om storleken av de planerade insatserna under den kommande treårsperioden för respektive process. Forskningsinsatsernas omfattning speglar inte nödvändigtvis processens betydelse för den långsiktiga säkerheten. Stora resurser har ju ofta redan lagts på de viktigaste processerna. Motsvarande information för initialtillståndet finns i tabell 3-2. De följande avsnitten ger en kort överblick av de viktigaste forskningsområdena för de olika delarna av förvaret, samt för biosfären och vad gäller klimatförändringar.

**Tabell 3-1. Forskning kring långsiktiga processer.**

	<b>Bränsle</b>	<b>Kapsel</b>	<b>Buffert</b>	<b>Återfyllning</b>	<b>Geosfär</b>
<b>R</b>	Radioaktivt sönderfall 4.2.2 Stråldämpning 4.2.3 Inducerad fission 4.2.4	Stråldämpning 5.2.2	Stråldämpning 6.2.2	Stråldämpning 7.2.3	
<b>T</b>	Värmetransport 4.2.5	Värmetransport 5.2.3	Värmetransport 6.2.3	Värmetransport 7.2.4	Värmetransport 8.2.2
<b>H</b>	Vatten/gastransport 4.2.6		Vattentransport omättad 6.2.4 Vattentransport mättad 6.2.5	Vattentransport omättad 7.2.5 Vattentransport mättad 7.2.6	Grundvattenströmning 8.2.3
<b>M</b>		Deformation insats 5.2.4 Yttre deformation Cu 5.2.5 Inre deformation Cu 5.2.7	Gastransport/gaslösning 6.2.6 Svällning 6.2.7 Mek vxv buffert/återfyll 6.2.8 Mek vxv buffert/kapsel 6.2.9 Mek vxv buffert/berg 6.2.10 Termisk expansion 6.2.11	Gastransport/gaslösning 7.2.7 Svällning 7.2.8 Mek vxv återfyll/berg 7.2.9	Gasströmning Rörelse intakt berg Reaktivering (jordskalk) 8.2.7 Sprickbildning Tidsberoende deform Termisk rörelse Erosion
<b>C</b>	Advektion/diffusion 4.2.8 Restgasradiolys 4.2.9 Vattenradiolys 4.2.10 Metallkorrosion 4.2.11 Bränsleupplösning 4.2.12 Lösning gapinvent 4.2.13 Speciering radionukl 4.2.14 Heliumproduktion 4.2.15	Termisk expansion 5.2.6	Advektion 6.2.13 Diffusion 6.2.14 Osmos (salteffekter) 6.2.15 Jonbyte/sorption 6.2.16 Montmorillonitomvandl 6.2.17 Lösning/fällning förören 6.2.18 Kolloidfrigörelse/erosion 6.2.19 Strålinducerad omvandl 6.2.20 Radiolys porvatten 6.2.21 Mikrobiella processer 6.2.22 THM-utveckling omättad 6.2.12 THMC-utveckl mättad 6.2.23	Advektion 7.2.11 Diffusion 7.2.12 Osmos (salteffekter) 7.2.13 Jonbyte/sorption 7.2.14 Montmorillonitomvandl 7.2.15 Lösning/fällning förören 7.2.16 Kolloidfrigörelse/erosion 7.2.17 Strålinducerad omvandl 7.2.18 Radiolys porvatten 7.2.19 Mikrobiella processer 7.2.20	Advektion/blandning 8.2.11 Diffusion 8.2.12 Reaktioner grundv/berg 8.2.13 Lösn/fälln sprickmin 8.2.14 Mikrobiella processer 8.2.15 Organisk nedbrytn 8.2.16 Kolloidomsättning 8.2.17 Gasbildning/lösning 8.2.18 Metanisomsättn 8.2.19 Saltutfrysning 8.2.20 HC-utveckling 8.2.21
<b>Integration</b>	HMC-utveckling skadad kapsel 5.2.16		Mikrobiella processer 6.2.22 THM-utveckling omättad 6.2.12 THMC-utveckl mättad 6.2.23		
<b>Radionuklid-transport</b>			Advektion 6.2.24 Diffusion 6.2.25 Sorption 6.2.26 Speciering 6.2.27 Kolloidtransport 6.2.28	Advektion 7.2.21 Diffusion 7.2.22 Sorption 7.2.23 Speciering 7.2.24	Advektion/disperion 8.2.22 Matrisdiffusion 8.2.23 Sorption 8.2.24 Speciering 8.2.25 Kolloidtransport 8.2.26 Gasttransport 8.2.27 RN-transport geosfär 8.2.28
<b>Kod:</b>	Stora insatser	Måttliga insatser	Små insatser/bevakning		under kommande treårsperiod

Tabell 3-2. Forskning kring förvarets initialtillstånd.

Bränsle	Kapsel	Buffert	Återfyllning	Geosfär
Geometri 4.1.2	Geometri 5.1.2	Geometri 6.1.2	Geometri 7.1.2	Platsundersökningar
Strålintensitet 4.1.3	Strålintensitet 5.1.3	Porgeometri 6.1.3	Porgeometri 7.1.3	
Temperatur 4.1.4	Temperatur 5.1.4	Strålintensitet 6.1.4	Strålintensitet 7.1.4	
Hydrovariabler 4.1.5	Mekaniska spänningar 5.1.5	Temperatur 6.1.5	Temperatur 7.1.5	
Mekaniska spänningar 4.1.6	Materialsammansättning 5.1.6	Smekthåll 6.1.6	Smekthåll 7.1.6	
Radionuklidinventarium 4.1.7	Vattenhalt 6.1.7	Vattenhalt 6.1.7	Vattenhalt 7.1.7	
Gapinventarium 4.1.8	Gashalter 6.1.8	Gashalter 6.1.8	Gashalter 7.1.8	
Materialsammansättning 4.1.9	Hydrovariabler 6.1.9	Hydrovariabler 6.1.9	Hydrovariabler 7.1.9	
Vattensammansättning 4.1.10	Svälltryck 6.1.10	Svälltryck 6.1.10	Svälltryck 7.1.10	
Gassammansättning 4.1.11	Smektingsammansättning 6.1.11	Smektingsammansättning 6.1.11	Smektingsammansättning 7.1.11	
	Porvattensammansättning 6.1.12	Porvattensammansättning 6.1.12	Porvattensammansättning 7.1.12	
	Föreningshalter 6.1.13	Föreningshalter 6.1.13	Föreningshalter 7.1.13	
<b>Kod:</b>	Stora insatser	Måttliga insatser	Små insatser/bevakning	under kommande treårsperiod



### 3.1 Bränsle

Om en kapsel skadas och grundvatten kommer i kontakt med det använda bränslet kommer bränslet på sikt att lösas upp. Bränsleupplösningen pekades i SR 97 och dess granskning ut som ett viktigt område där kunskapen behöver förbättras genom ytterligare forskning. I avsnitt 4.2.12 presenteras SKB:s program för forskning kring denna process samt en del nya resultat.

### 3.2 Kapsel

För en initialt intakt kapsel konstateras i SR 97 att osäkerheterna framför allt gäller hållfastheten vid belastningar under en glaciation och vid jordskalv. Hållfastheten vid isostatiska belastningar behöver beräknas med realistiska materialdata för gjutjärnsinsatsen, se avsnitt 5.2.4. Hållfastheten vid berg rörelser har endast beräknats för en klenare kapsel än SKB:s nuvarande referenskapsel och med ofullständiga mekaniska data för bufferten. Studien behöver moderniseras, se avsnitt 5.2.4. Stora resurser läggs också på studier av kopparkorrosion, avsnitt 5.2.12 och spänningskorrosion i kopparkapseln, avsnitt 5.2.13.

Vad gäller kapselns initiala täthet är det angeläget att utöka kunskapen om typer av och sannolikheter för otätheter eller defekter framför allt i kapselns locksvets. Programmet för detta nämns i avsnitt 5.1.2 och utvecklas mer i kapitel 15.

För kapslar med en antagen initial skada är det angeläget att fördjupa kunskapen om den kopplade kemiska, hydrauliska och mekaniska utvecklingen som blir följd om vatten tränger in i kapseln. Den kemiska korrosionen av gjutjärnsinsatsen behandlas i avsnitt 5.2.8, korrosionsprodukternas mekaniska påfrestningar på kopparhöljet i avsnitt 5.2.7.

Som ett led i optimeringen av kapseln kommer också den långsiktiga säkerheten att utredas för en variant där kopparhöljets tjocklek minskats från 50 till 30 mm och insatsens tjocklek ökats i motsvarande grad. Grunden för denna studie är att korrosionsskyddet (koppartjockleken) idag bedöms vara betydligt kraftigare överdimensionerat än hållfastheten, som bl a bestäms av insatsens tjocklek, se vidare kapitel 5.

### 3.3 Buffert

Bufferten genomgår efter deponering en komplicerad termo-hydro-mekanisk (THM) utveckling då den vattenmättas. Förloppet pågår något tiotal år och kunskapen om de kopplade processerna under denna fas är inte fullständig. En sådan kunskap är heller inte nödvändig för säkerhetsbedömningarna, däremot är det viktigt att förstå och kunna förutsäga buffertens tillstånd efter fullbordad vattenmättnad, eftersom detta utgör utgångspunkten för analysen av den långsiktiga utvecklingen. Därför studeras buffertens inledande THM-utveckling i fält och med modeller, se avsnitt 6.2.12.

För en vattenmättad buffert är utvecklingen betydligt långsammare och kopplingarna enklare att hantera. Även här bedrivs integrerade studier, både i fält och med modeller, avsnitt 6.2.23. Enskilda processer där ytterligare forskning är angelägen är effekterna av saltvatten, avsnitt 6.2.15 samt kolloidfrigörelse/erosion, avsnitt 6.2.19. Vad gäller transport av radionuklider kan fenomenet ytdiffusion kräva ytterligare studier, avsnitt 6.2.25.

### 3.4 Återfyllning

Återfyllningen har i SR 97 och i tidigare säkerhetsanalyser behandlats mindre utförligt än andra delar av förvaret, delvis för att dess egenskaper inte varit slutgiltigt specificerade i KBS-3-konceptet. I SR 97 konstaterades att "en mer detaljerad analys av återfyllningens utveckling" både vid dagens klimat och klimatförändringar krävs i kommande analyser.

Under perioden kommer olika sammansättningar (smektitleror blandade med bergkross i olika proportioner) av återfyllningen att testas, både vad gäller praktisk användbarhet och långsiktiga egenskaper, se avsnitt 7.2.2. Den långsiktiga utvecklingen styrs i stort av samma processer som för bufferten. En stor kunskapsbas finns därför att tillgå, även om den relativa betydelsen och omfattningen av processerna kan vara annorlunda än i bufferten.

Processer av särskild betydelse att utreda är svällningsförloppet och den efterföljande långsiktiga mekaniska utvecklingen, bl a till följd av påverkan av saltvatten, avsnitten 7.2.9 och 7.2.13, andra kemiska omvandlingar, avsnitt 7.2.15 samt kolloidfrigörelse/erosion, avsnitt 7.2.17. Dessutom krävs en analys av huruvida återfyllningen skulle kunna komma att utgöra en preferentiell transportväg för radionuklider, avsnitt 7.2.21.

### 3.5 Geosfär

Modelleringen av jordskalv var inte färdigutvecklad i SR 97. SKB konstaterade att utvecklingen behöver drivas vidare och ett antal punkter för vidare studier angavs. I avsnitt 8.2.7 beskrivs hur flera av dessa punkter nu är beaktade samt planerna för den fortsatta utvecklingen. Målet är att jordskalvsanalyserna ska användas vid utplaceringen av kapselpositioner så att kapselskador till följd av jordskalv helt ska kunna undvikas. Dessutom är avsikten att jordskalv inte studeras i ett eget scenario som i SR 97 utan att fenomenet integreras i samtliga scenarier.

Modellutvecklingen för grundvattenströmning syftar till att göra huvudalternativen, kontinuummodellerna, mer flexibla samt till att vidareutveckla alternativa, diskreta modeller, se avsnitt 8.2.3.

SR 97, liksom tidigare analyser, visar att det s k transportmotståndet, som beror av flödesförhållanden samt geometriska egenskaper hos vattenförande sprickor, är avgörande för hur radionuklider transporteras i geosfären. I SR 97 och dess granskning konstateras också att förståelsen för transportmotståndet och hur den bör hanteras i säkerhetsanalysen, behöver förbättras. Programmet för detta presenteras i avsnitt 8.2.23.

De väsentligaste frågorna om framtida hydrokemiska förhållanden är till stor del klarlagda, se vidare avsnitt 8.2.21. Det enskilda större område som återstår gäller mikrobiella processer, ett område där forskningen startade relativt sent. Det är idag känt att mikrober förekommer på förvarsdjup och betydligt djupare. Mikroberna påverkar bl a redoxförhållandena och kan ha stor betydelse som redoxbuffert om t ex syresatt glacialvatten skulle tränga ner i berggrunden, se vidare avsnitt 8.2.15.

Långvarig växelverkan mellan grundvatten och bentonit kan påverka grundvattenkemin i närområdet. Grundforskning på detta område fortgår också, se avsnitt 8.2.13. Beredskap för att utreda nya hydrogeokemiska frågor som uppkommer vid platsundersökningarna kommer att bibehållas.

I granskningen av SR 97 konstateras att nedträngning av syresatt vatten vid en glaciation inte behandlats tillräckligt utförligt. Myndigheterna efterlyste också en utförligare behandling av radionuklidtransport med kolloider. Programmet för dessa båda punkter presenteras i avsnitten 8.2.14 respektive 8.2.26.

En metodisk hanteringen av all geofärsinformation från platsundersökningarna kommer också att kräva betydande insatser under perioden, se avsnitt 13.3.

### **3.6 Biosfär**

Biosfärens utveckling kommer alltid att utgöra en väsentlig del av en säkerhetsanalys, i första hand eftersom konsekvenserna av eventuella utsläpp från ett djupförvar uppkommer i biosfären. Till skillnad från geosfären kan biosfären förväntas förändras kraftigt under den tid förvarets säkerhet ska bedömas, framför allt till följd av framtida klimatförändringar. På en given plats kan därför en rad olika biosfärer förväntas i en framtid. Konsekvenserna av tänkbara utsläpp från förvaret måste vara acceptabla i alla dessa om förvaret ska kunna anses vara säkert.

Radionuklidomsättningen i biosfären beskrivs i säkerhetsanalysen vanligen med s k kompartmentmodeller där biosfären delas upp i ett antal relativt homogena delenheter mellan vilka överföringar av radionuklider beräknas. I tidigare analyser har beskrivningen av överföringarna baserats på grova empiriska mätningar och uppskattningar. För närvarande pågår en utveckling mot mer realistiska s k processorienterade beskrivningar, där beräkningen av överföringar baseras på kunskapen om de bakomliggande mekanismerna, se vidare avsnitten 9.3 till 9.5. Bland de ekosystem som studeras och modelleras märks skog, myrmark och sediment, se avsnitten 9.6 till 9.8. Långtidsvariationer i bl a klimat, landhöjning och salthalt är avgörande för biosfärens utveckling, se avsnitt 9.9. Platsundersökningarna ställer, vad gäller biosfären, stora krav på metodikutveckling, vilket beskrivs i avsnitt 9.12.

### **3.7 Klimatförändringar**

Klimatförändringar kan med stor säkerhet förväntas i det mer än hundrausenåriga perspektiv som djupförvarets säkerhet ska analyseras. En beskrivning av dessa och av den påverkan de kan ha på förvaret är därför nödvändig i en säkerhetsanalys. Osäkerheterna kring den framtida klimatutvecklingen är stora och beskrivningen av hur olika klimattillstånd avlöser varandra blir med nödvändighet skissartade. Däremot kan man med större säkerhet säga att vissa klimattillstånd kommer att råda under åtminstone någon epok i framtiden, även om epoken inte kan preciseras tidsmässigt. Säkerhetsanalysen är därför inriktad på att beskriva ett antal klimattillstånd och den effekt de har på förvaret. Forskningsprogrammet för att beskriva framtida klimatförändringar och de olika klimattillstånden beskrivs i kapitel 10.



## 4 Bränsle

Flera sorters bränsle ska deponeras i förvaret. För ett alternativ med 40 års reaktordrift uppskattas mängden BWR-bränsle till ungefär 7 000 ton och mängden PWR-bränsle till ungefär 2 300 ton /4-1/. Utöver detta kommer det att deponeras 23 ton MOX-bränsle och 20 ton bränsle från reaktorn i Ågesta. Utbränningen kan variera från cirka 15 MWd/kgU till 55–60 MWd/kgU.

I SR 97 gjordes i de flesta delanalyser det förenklade antagandet att alla kapslar innehåller BWR-bränsle av typ SVEA 96 med en utbränningsgrad av 38 MWd/tU. De hypotetiska förvaren dimensionerades för 8 000 ton bränsle, vilket motsvarar 4 000 kapslar.

PWR-bränsle skiljer sig marginellt från BWR-bränsle när det gäller innehållet av radionuklider. Andra aspekter av betydelse i säkerhetsanalysen, t ex bränslekapslingsrörens geometri, hanteras i regel så pessimistiskt i analyser av radionuklidtransport att skillnader mellan olika bränsletyper blir irrelevanta. MOX-bränslet har högre resteffekt än uranbränsle, vilket gör att en mindre mängd bränsle kan deponeras i varje kapsel.

För kriticitetsbedömningar blir skillnader mellan olika bränsletyper viktigare. I SR 97 behandlades BWR-bränslet av typ SVEA 64 och PWR-bränsle av typ FA17x17, eftersom dessa typer är mest ogynnsamma i kriticitetshänseende.

### 4.1 Initialtillstånd bränsle/hållrum

#### 4.1.1 Variabler

I SR 97 beskrevs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller inte bara själva bränslet utan även hållrummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. I hållrummet kommer då processer som bränsleupplösning och korrosion av gjutjärnsinsatsen att äga rum. Hållrummet skulle alltså kunna ingå i endera systemdelen bränsle eller kapsel och har här inkluderats i bränslet. Variablerna definieras i tabell 4-1.

Initialtillståndet, dvs värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 6.2. I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i bränslet.

**Tabell 4-1. Variabler i bränslet.**

Variabel	Definition
<b>Geometri</b>	Geometrisk mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och Zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår.
<b>Strålintensitet</b>	Intensitet av $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
<b>Temperatur</b>	Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
<b>Hydrovariabler</b>	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hålrum.
<b>Mekaniska spänningar</b>	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
<b>Totalt radionuklidinventarium</b>	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar.
<b>Gapinventarium</b>	Förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser.
<b>Materialsammansättning</b>	De material som bränsleelementets olika delar består av, exklusive radionuklider.
<b>Vattensammansättning</b>	Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hålrum.
<b>Gassammansättning</b>	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hålrum.

#### 4.1.2 Geometri

##### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I de flesta delanalyser i SR 97 antas förenklat att alla kapslar innehåller BWR-bränsle av typ SVEA 96. Det verkliga förvaret kommer att innehålla bränsle av flera olika typer och geometrier. Bränsleelementets geometri är av underordnad betydelse för den långsiktiga säkerheten.

Under drift spricker de ursprungligen cylindriska bränslekutsarna med en ytförstoring som följd. Omfattningen av denna ytförstoring, som kan vara av betydelse om bränslet kommer i kontakt med vatten i ett djupförvar, är ofullständigt känd.

##### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Den bränslearea som är tillgänglig för korrosionsangrepp av grundvatten är en väsentlig parameter vid bestämning av absoluta korrosionshastigheter. Detta gäller i särskild grad vid behandlingen av data från flödeslakningar av använt bränsle, som nyligen påbörjats i Studsvik. Tidigare har bränslets specifika area bestämts med BET-metoden för två av de referensbränslen som används i SKB:s experimentprogram /4-2/. Vid mätningar med kryptonadsorption erhöles reproducerbara värden på arean i området 70–120 cm<sup>2</sup>/g. För flödeslakningarna har flera PWR-bränslefragment malts och siktats. Därefter har arean på två fraktioner (0,125–0,25 mm och 0,25–0,50 mm) bestämts med Kr-BET-metoden. De bränsleprover som ska användas till experimenten med flödeslakningar lagras i argon-atmosfär.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

SKB har tillsammans med andra organisationer beviljats medel till ett EU-projekt (Spent fuel stability under repository conditions, 2001–2004) där forskning om långtidsförändringar i bränslets struktur och geometri ingår. Bland annat ska tidsutvecklingen hos den omedelbart tillgängliga andelen av radionuklidinventariet studeras. Projektet omfattar:

- En statistisk analys av alla tillgängliga litteratordata.
- Diffusionsberäkningar för transport av radionuklider till bränslekorngränser innan bränslet kommer i kontakt med vatten.
- En uppskattning av långsiktiga förändringar av bränsleytans storlek.

#### **4.1.3 Strålintensitet**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Strålintensiteten beror av radioaktiviteten, dvs inventariet av radionuklider och bränslets geometri. Båda dessa är väl kända och dosraten kan beräknas med tillräcklig noggrannhet för säkerhetsanalysens behov.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

#### **4.1.4 Temperatur**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Den största osäkerheten i beräkningarna av temperaturen på bränslet och i hålrummet likaväl som i de olika delarna av kapseln var osäkerheterna kring värmeöverföringen mellan de olika komponenterna i kapseln och mellan kapseln och bentoniten under vattenmättnadsskedet. Det kritiska gränssnittet i kapseln är övergången mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet. Koppars emissivitet är av avgörande betydelse.

Myndigheterna anser att en mer detaljerad studie av ytegenskapernas betydelse för värmeöverföringen behövs för att formulera designkraven för kapsel- och insatsytorna, både med avseende på maskinbearbetning och lagring av kapslar före deponeringen. Tillsammans med erfarenheter av vilka egenskaper kapselns yta får vid tillverkningen, bör osäkerheten i emissivitet kunna minskas.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

#### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

SKB planerar att under den kommande treårsperioden genomföra studier av ytegenskapernas betydelse för värmeöverföringen. Syftet är att formulera konstruktionskrav för kapselytorna. Därefter kommer nya beräkningar av den initiala temperaturfördelningen i en kapsel att genomföras.

#### **4.1.5 Hydrovariabler**

Hydrovariablerna, dvs vattentryck, vattenflöden och gasflöden är inte relevanta att beskriva initialt, eftersom kapseln förutsätts vara intakt.

#### **4.1.6 Mekaniska spänningar**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Bränslekutsarna har inbyggda spänningar på grund av bl a korntillväxt till följd av kärnklyvningar och bestrålning. Kristallerna i kutsarna kan förändras något under bestrålning beroende på temperatur och utbränning. Bränslestavarna och konstruktionselementen har inbyggda spänningar på grund av övertryck från fissionsgaser och gasfyllning. Dessa varierar med fabrikat och utbränningsgrad. Spänningsfördelningen i elementen påverkas på ett oöverskådligt sätt av bestrålningen i reaktorn. Bestrålningen kan leda till dimensionsförändringar i konstruktionsmaterialen. Detta påverkar bränslekutsarnas yta vilket har betydelse för hur snabbt radionuklider kan frigöras om bränslet kommer i kontakt med vatten. Data till säkerhetsanalysen baseras på ytbestämningar av använt bränsle som påverkats av processerna och förhållandena ovan, se avsnitt 4.1.2.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

##### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.



## ***Forskningsprogram***

En viss insats kommer att göras inom EU-projektet Spent fuel stability under repository conditions, se avsnitt 4.1.2.

### **4.1.7 Totalt radionuklidinventarium**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Osäkerheten i beräkningar av inventariet av radionuklider i bränslet ligger som mest på något tiotal procent och är bl a relaterad till bränslets utbränningsgrad.

I SR 97 beräknades data för nuklidinnehåll, resteffekt och strålning med programmet ORIGEN. SKI påpekar att denna typ av beräkningar inte har validerats för vissa nuklider, t ex Cl-36, Se-79 och Sn-126.

Myndigheterna bedömer att SKB:s beskrivning av bränslets egenskaper är godtagbar, men att osäkerheterna i bränslets sammansättning behöver studeras närmare. Myndigheterna efterlyser också en tydligare redovisning av betydelsen av andra utbränningsgrader och bränsletyper (MOX).

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Ingen egen utveckling av beräkningsprogram för inventarier kommer att göras. Den interna dokumentation av programmens tillförlitlighet, verifiering och validering behöver stärkas.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

## ***Forskningsprogram***

En ny beräkning av radionuklidinventarium och resteffekt kommer att genomföras. I samband med denna valideras beräkningsmodellen för enskilda nuklider, t ex Cl-36, Se-79 och Sn-126.

Inför nästa säkerhetsanalys kommer en studie av alla de bränsletyper som ska deponeras i förvaret att genomföras. Avsikten är att belysa skillnader i inventarier, resteffekter, lättlöslig fraktion, etc.

### **4.1.8 Gapinventarium**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Vissa radionuklider ansamlas på bränslekutsarnas yta och blir därmed mer lättillgänglig för transport. Uppskattningen av den andelen baseras på experimentella data från framför allt kanadensiskt CANDU-bränsle. I SR 97 diskuterades osäkerheter i gapinventariet ingående i Datarapporten, men inga konkreta frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI föreslog studier av fördelningen av relativt lösliga radionuklider i det använda bränslet.

## **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Generellt är överensstämmelsen god mellan de andelar lösliga nuklider som SKB föreslår och de som använts i ett EU-projekt som behandlar säkerheten vid slutförvaring av använt bränsle /4-3/.

Den lösliga fraktionen av nuklider i använt bränsle uppskattas vanligtvis indirekt genom mätningar av fissionsgasutsläpp. Direkta lakmätningar är svåra, eftersom en del t ex cesium också finns i bränslematrisen och går i lösning tillsammans med bl a korngränsfraktionen. Nya resultat tyder på att bränslematrisupplösningen är mycket begränsad i närvaro av vätgas (tryck- och temperaturförhållanden återstår att fastställa), se vidare avsnitt 4.2.12. Detta gör det möjligt att bestämma den lösliga fraktionen med större noggrannhet än vad som tidigare var möjligt. Preliminära resultat från sådana försök /4-4/ visar att uranhalter och andelen lösliga nuklider (t ex cesium och jod) är lägre än förväntat. Mindre än en procent av det totala cesium- eller jodinventariet i bränslepulver uppmättes i lösning efter 15 dagar.

En studie av lakning och elektrokemiskt beteende av syntetiska metallpartiklar liknande de som bildas i använt bränsle /4-5/ har visat att molybden lakas ut selektivt med 3–4 storleksordningar högre hastighet än rutenium, rhenium och palladium vid både anoxiska och oxiderande förhållanden. Detta stämmer väl med data från bränslelakning (se t ex figur 4-4 i avsnitt 4.2.12).

## **Forskningsprogram**

Försök i vätgasmiljö med bränslekutsar med varierande utbränning och bestrålningshistoria planeras. Om möjligt ska sådana kutsar användas där utsläppet av fissionsgas redan har bestämts.

Metalliska partiklar innehållande platinagruppermetaller samt molybden och teknetium ska extraheras från använt bränsle med icke oxiderande reagens (fosforsyra) i stället för salpetersyra, för att undvika upplösning av mindre korn. Upplösningshastigheten av olika komponenter från dessa partiklar under olika redoxförhållanden ska bestämmas i kommande försök.

### **4.1.9 Materialsammansättning**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Osäkerheterna när det gäller materialsammansättning är små, bl a eftersom kvalitetskraven vid tillverkningen av bränsleelement är mycket höga.

Myndigheterna påpekar att effekter av icke radioaktiva fissionsprodukter såsom xenon skulle ha behövt beskrivas närmare, eftersom de kan ha både positiv och negativ säkerhetsmässig betydelse.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

SKB kommer att göra en studie av betydelsen av icke radioaktiva fissionsprodukter före nästa säkerhetsanalys. Studien avser att gå igenom samtliga fissionsprodukter och dokumentera deras egenskaper och vilken betydelse de kan ha i ett slutförvar.

#### **4.1.10 Vattensammansättning**

Temperatur och tryck i bränslets och kapselns hålrum vid deponeringstillfället är sådana att vatten förekommer som ånga, se gassammansättning nedan.

#### **4.1.11 Gassammansättning**

##### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

###### *Gap mellan bränslekutsar och kapslingsrör*

Bränslestavarna fylls med helium till ett tryck av 0,4 MPa vid tillverkning. Dessutom finns det fissionsgaser från driften. Vid deponeringstidpunkten finns huvudsakligen Kr-85 kvar.

###### *Kapselns hålrum*

Kapseln kommer att förslutas vid atmosfärstryck eller i vakuum, vilket gör att trycket i kapselns hålrum kan bli ett par atmosfärer om den initiala temperaturen blir så hög som 400 °C.

###### *Vattenånga*

Den största mängden vatten i en kapsel uppskattas till 50 gram. Detta värde motsvarar tomvolymen i en bränslestav och förutsätter alltså att en Zirkaloykapsling är defekt under drift eller mellanlagring.

##### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

##### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

##### **Forskningsprogram**

Förutom vad som sägs i avsnitt 4.1.9 om betydelsen av icke radioaktiva fissionsprodukter bedöms området idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## 4.2 Processer i bränsle/hålrums

### 4.2.1 Översikt av processer

En rad processer kommer över tiden att förändra tillståndet i bränslet och i kapselns hålrums. Vissa sker under alla förhållanden medan andra bara är möjliga om kopparkapselns isolering bryts och vatten tränger in i kapseln.

Radionukliderna i bränslet kommer med tiden att omvandlas till icke radioaktiva 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 hålrums att leda till bildning av små mängder korrosiva gaser som skulle kunna bidra till spänningskorrosion av gjutjärnsinsatsen.

Om kopparkapseln inte är intakt kan vatten transporteras in i kapselns hålrums. Den kemiska miljön förändras därigenom radikalt. Genom radiolys av vattnet i hålrums kommer den kemiska miljön att förändras ytterligare. Vattnet i kapseln orsakar korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar i bränslet. Om kapslingsrörens isolering skulle vara initialt bruten eller brytas genom korrosion eller mekaniska påfrestningar kommer bränslet i kontakt med vatten. Detta leder dels till upplösning av radionuklider som samlats på bränslematrisens yta, dels till upplösning eller omvandling av bränslematrisen och frigörande av radionuklider. Radionukliderna kan antingen lösas i vattnet och bli tillgängliga för uttransport eller falla ut i fasta faser i kapselns tomrum. Detta bestäms av de kemiska förhållandena i kapselns hålrums. Vid bränsleupplösningen kan också kolloider med radionuklider bildas.

Vattenlösta radionuklider kan transporteras med rörligt vatten i kapseln, advektion, eller genom diffusion i stillastående vatten. Kolloider med radionuklider kan transporteras på samma sätt. Vattenlösta nuklider kan sorberas till de olika materialen i kapseln. Vissa nuklider kan också transporteras i gasfas.

Slutligen kan vatten dämpa energin hos neutroner i kapselns hålrums. Lågenergetiska neutroner kan därefter orsaka fission av vissa nuklider i bränslet, under frigörande av fler neutroner. Om förhållandena är ogynnsamma kan kriticitet uppnås, dvs processen blir självunderhållande.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i bränslet.

## **4.2.2 Radioaktivt sönderfall**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

SKB anser att förståelsen för de strålningsrelaterade processerna är god. Tillgången på data och modeller av god kvalitet anses också var god.

Myndigheterna instämmer i dessa slutsatser. De förlopp som avses (radioaktivt sönderfall och absorption av strålning) är enligt myndigheternas uppfattning bland de mest väl kända av de processer som behöver beaktas i en säkerhetsanalys.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Halveringstiderna för de aktuella radionukliderna är i allmänhet kända med god noggrannhet. Nya data som rör halveringstiderna för Se-79 och Sn-126 tillkom dock under arbetet med SR 97. Med anledning av detta avser SKB att genomföra en kvalitetsgranskning av data för halveringstiderna för samtliga radionuklider som är aktuella i säkerhetsanalyserna. Detta ska vara klart i god tid före nästa säkerhetsanalys.

## **4.2.3 Stråldämpning/värmealstring**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 dras slutsatsen att förståelsen av de strålningsrelaterade processerna är god, vad gäller stråldämpning/värmealstring. Tillgången på data och modeller av god kvalitet anses också vara tillräcklig.

Myndigheterna instämmer i dessa slutsatser. De förlopp som här avses (radioaktivt sönderfall och absorption av strålning) är enligt myndigheternas uppfattning bland de mest väl kända av de processer som behöver beaktas i en säkerhetsanalys.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

#### **4.2.4 Inducerad fission (kriticitet)**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

SKB konstaterar att med nuvarande utformning av kapseln kan kriticitet inte uppstå om vatten tränger in i kapseln, förutsatt att bränslet är intakt och hänsyn tas till bränslets utbränning. SKB hävdar vidare att sannolikheten för kriticitet utanför kapseln på grund av utläckage av klyvbart material är mycket liten, och att konsekvenserna av en eventuell kriticitet skulle vara små.

Myndigheterna håller med om att kriticitet inte är trolig förutsatt att bränslet är tillräckligt utbränt och att geometrin inte förändras. Myndigheterna anser också att det är en svaghet att hänsyn måste tas till utbränningen.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI efterfrågar en uppdatering av kriticitetsanalyserna för kapseln.

##### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

SKB har påbörjat en studie av säkerhetsmarginalen mot kriticitet. En jämförande studie har genomförts av de kriticitetsberäkningar som gjorts av SKB, Posiva och Nagra, eftersom man fått olika resultat /4-6/. Slutsatser var att skillnaderna i k-värden mellan SKB:s resultat och Posivas kan förklaras fullt ut med att det fanns skillnader i bränsletyper, anrikningar, kapselmateriel och kapseldimensioner i de båda beräkningarna. Skillnaderna i k-värden mellan SKB:s resultat och Nagra kunde inte förklaras på samma sätt. Senare utredningar har visat att i Nagra's scenario stod ett oändligt antal kapslar tätt packade i luft (vakuum) medan SKB antog ett oändligt antal kapslar i bentonit. När man tagit hänsyn till detta var skillnaderna mellan Nagra's och SKB:s resultat acceptabla.

##### ***Forskningsprogram***

SKB fortsätter det påbörjade programmet med en utvärdering av osäkerheten i nödvändiga data för att kunna ta hänsyn till lantaniderna i bränslet vid bedömningen av riskerna för kriticitet. Nästa steg blir att identifiera realistiska olycksscenarier, som kan behöva kontrollberäknas. Programmet beräknas kunna avslutas under treårsperioden.

#### **4.2.5 Värmetransport**

Behandlas i avsnitt 4.1.4.

#### **4.2.6 Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation**

Om kopparkapseln inte är intakt kan vatten tränga in i kapselns hålrum som vätska eller ånga. Transporten av vatten, vattenånga och andra gaser i kapseln bestäms sedan av den detaljerade geometrin för kapselns hålrum, förekomsten av vatten/ånga i hålrummen samt temperatur och tryck. Kokning/kondensation utgör en integrerad del av vatten/gastransporten. Processen är starkt kopplad till flera andra processer. Processerna behandlas samlat i avsnitt 5.2.16.

#### **4.2.7 Termisk expansion/kapslingsbrott**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Processen saknar betydelse för den långsiktiga säkerheten så länge kopparkapseln är intakt. För initialt skadade kapslar kan pessimistiskt ansättas att alla kapslingsrör kan vara skadade, men att de fortfarande utgör fysiskt skydd för bränslet samt att bränslelementen behåller sin ursprungliga geometri. Samma resonemang kan föras för återtag av kapslar.

Frågan diskuteras inte av myndigheterna.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

##### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

##### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

#### **4.2.8 Advektion och diffusion**

I SR 97 konstateras att 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 7.3 behandlas transport av radionuklider.

Processen har inte kommenterats i granskningen av SR 97, FUD-program 98 eller dess granskning. SKB avser att även i kommande säkerhetsanalyser pessimistiskt förenkla denna process på liknande sätt som i SR 97.

#### **4.2.9 Restgasradiolys/syrabildning**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Restluft, vatten och radiolytiskt bildad salpetersyra kommer att förbrukas genom korrosionsreaktioner med kapselinsatsen. Den totala omfattningen av allmänkorrosionen är försumbar. Processen kan därför försummas i säkerhetsanalysen. Eventuell spänningskorrosion bedöms sakna betydelse för kapselns livslängd.

Frågan diskuteras inte i myndigheternas granskning.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Frågan diskuteras inte.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

#### **4.2.10 Vattenradiolys**

Denna process avser radiolys av vatten i utrymmet mellan bränslekapsling och gjutjärnsinsats. Radiolys av betydelse för bränsleupplösningen i utrymmet innanför en skadad bränslekapsling, behandlas i avsnitt 4.2.12.

### ***Slutsatser i SR 97 och granskning***

SKB:s slutsats var att den grundläggande förståelsen för gammarradiolys av vatten som trängt in i hålrummet mellan bränsle och kapsel är tillräcklig för säkerhetsanalysen. SKI noterar att en av deras granskare ifrågasätter om tillräcklig hänsyn tagits till de aeroba korrosionsmekanismer som orsakas av bildningen av syre och andra oxidanter från radiolys av använt bränsle, se vidare avsnitt 4.2.12.

### ***Slutsatser i FUD 98 och granskning***

Frågan diskuteras inte.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Järnkorrosion i initialt syrefritt vatten under gammabestrålning kommer att studeras under perioden med start tidigast under 2002. Undersökningarna knyter an till korrosionsstudierna som diskuteras i avsnitt 5.2.8.

#### **4.2.11 Metallkorrosion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Den grundläggande förståelsen för processen är tillräcklig för säkerhetsanalysens behov. Osäkerheterna ligger huvudsakligen i om de korrosionshastigheter som observerats i korttidsexperiment är relevanta för mycket långa tidsperioder. Tillgängliga data tyder på att kapslingsrören har en livslängd på minst 100 000 år. Rören kan pessimistiskt antas vara skadade eller korroderade, men i stort sett ha kvar sin mekaniska integritet under mer än 100 000 år och fungera som ett mekaniskt stöd för kolonnen av bränslekutsar.

Frågan diskuteras inte i myndigheternas granskning.



### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Frågan diskuteras inte.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **4.2.12 Bränsleupplösning**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Bränsleupplösningen identifieras som den största kvarstående kunskapsmässiga osäkerheten i SR 97.

Myndigheterna anser att resultaten från SKB:s modell för upplösning av använt bränsle måste anses som otillräckligt dokumenterade för att vara direkt användbara som stöd för en konsekvensanalys. Eftersom det kan ifrågasättas om kunskapsunderlaget är tillräckligt, anser myndigheterna att SKB i SR 97 borde använt mera robusta antaganden för att uppskatta en övre gräns för bränslets upplösningshastighet. SKB uppmanas att ägna mer uppmärksamhet åt resultaten från de omfattande försöken med använt bränsle vid Studsviks laboratorium.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI och Kasam anser att SKB:s experimentella insatser på ett adekvat sätt har inriktats mot frågeställningar som är angelägna att lösa och som är av betydelse för säkerhetsanalyser. SKI anser att SKB:s arbeten generellt är av god vetenskaplig kvalitet och utgör ett betydande bidrag till den internationella forskningen. Studier av mekanismen som styr frigörelsen från metalliska inneslutningar i använt bränsle föreslås av både SKI och Kasam. Kasam understryker bland annat behovet av hög kvalitet på analysresultaten. SKI rekommenderar studier om fördelningen av relativt lättlösliga radionuklider i det använda bränslet.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97 samt forskningsprogram**

En del av SKB:s bränsleprogram ska under perioden 2001–2004 genomföras inom ramen för två EU-projekt. Sedan hösten 2000 pågår projektet "Rates and mechanisms of radioactive release and retention inside a waste disposal canister", där SKB samordnar insatserna på termodynamisk och kvantmekanisk modellering av de kemiska reaktionerna i hålrummet i kapseln. Under 2001 kommer projektet "Spent fuel stability under repository conditions" där SKB kommer att samordna experimenten inom bränsleupplösning och radiolys. Nedan presenteras SKB:s egna forskningsinsatser.

## A. Analytiska metoder

Numera kan man vid Studsvik snabbt separera löst oxiderat U(VI) från reducerat U(IV) och analysera mycket låga uranhalter ( $10^{-9}$  M) /4-7/. Metoden har använts för att studera oxidationskinetiken när U(IV) går över till U(VI). De uppmätta oxidationshastigheterna har publicerats /4-8/ och stämmer väl med uppgifter i litteraturen. Undersökning av plutoniums redoxkinetik med samma teknik har också avslutats och presenterats /4-9/. Genom att på detta sätt bestämma oxidationstalerna för olika nuklider i bränslelaktlösningar kan upplösningen av bränsle i kontakt med vatten lättare förstås och beräknas.

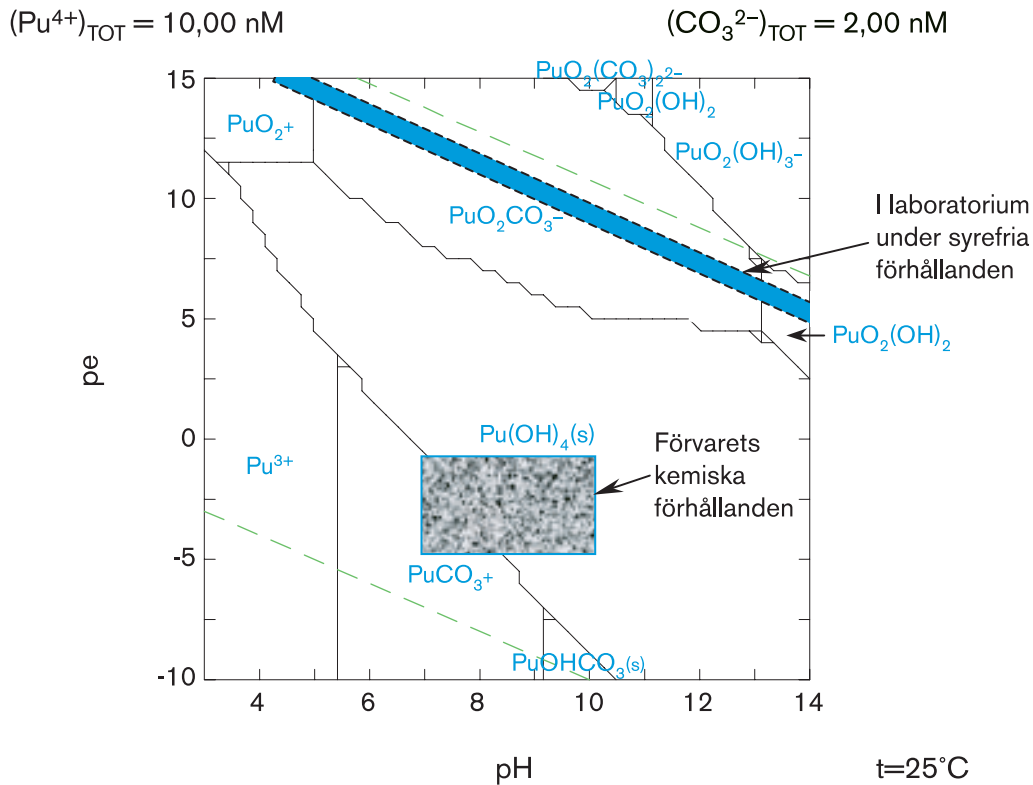
### *Forskningsprogram*

En bättre metod för jodanalyser ska tas fram för att bestämma den lösliga fraktionen i bränsle (osäkerheterna med nuvarande ICP-MS-metoden är stora). Vidareutveckling av plutoniumspeciering i laktlösningar är också planerad. För att med bättre noggrannhet kunna analysera de låga halter radionuklider som erhålls vid lakning av använt bränsle under reducerande förhållanden, planeras inköp av en ICP-MS med sektormagnet till Studsvik. En sektormagnet ger betydligt bättre massupplösning än den kvadrupol som används i det nuvarande instrumentet.

## B. Redoxförhållanden vid bränsleupplösning

I mer än två år har pH och  $E_h$  mätts fortlöpande i experiment med lakning av utbränt bränsle. Målet är att förstå korrosionen av bränslet i kontakt med vatten. Dessa mätningar har bidragit till en bättre förståelse av begreppet "anoxiska förhållanden". I strikt geokemisk mening är "anoxisk" synonymt med "helt syrefri", som i t ex djupa grundvatten. Vid forskning kring förvarets långsiktiga säkerhet i allmänhet har man ofta försökt efterlikna djupförvarsförhållanden genom att kontinuerligt låta en inert gas som argon eller kväve, passera genom systemet. Mätningar /4-10/ visar att i sådana fall räcker halten syre som diffunderar in i systemet till att skapa starkt oxiderande förhållanden, motsvarande ett  $E_h$  större än +600 mV vid pH = 8. Figur 4-1 visar skillnaden mellan pe-pH områdena för "anoxiska" laborieförhållanden och djupförvaret i ett predominsdiagram för plutonium.

Eftersom skillnaden i syretryck mellan atmosfärsförhållanden och som bäst någon bråkdels ppm syre i mätkärl är sex till sju storleksordningar är det mycket svårt att undvika indiffusion av syre. Detta betyder också att även om halten syre är relativt låg, tillförs syre konstant från omgivningen, då befintligt syre förbrukas genom att oxidera bränslet. Eftersom syrehalten som produceras genom radiolys är av storleksordning  $10^{-7}$  M /4-11, 4-12/ kan emellertid nivån på indiffunderat syre hållas två till tre storleksordningar lägre än halten radiolytiskt syre. Detta betyder att undersökningar av bränsleupplösning under anoxiska förhållanden ändå kan vara relevanta. De skulle då motsvara en övre gräns för bränsleupplösningshastigheten i grundvatten, som inte är redoxbuffrade med komponenter från närområdet som t ex  $Fe^{2+}$  eller vätgas (se nästa avsnitt). Resultaten visar också tydligt att de traditionella experimenten i öppna kärl (syrehalter större än  $10^{-4}$  M, dvs mer än tre storleksordningar högre än radiolytiskt producerat syre) ger alltför pessimistiska värden på lakningen.



**Figur 4-1.** Predominansdiagram för plutonium, där också  $pe$ - $pH$  områden för djupförvarsförhållanden och anoxiska förhållanden visas.

### Forskningsprogram

Redoxpotential ska även i fortsättningen mätas i försök med bränslekutsar i hotcell, där argon införs genom metallrör och med bättre tätningar för att minimera syrediffusion. Guldelektroder och platinaelektroder används för att urskilja påverkan av upplösta gaser på platinaelektroden. Detsamma gäller för planerade flödeslagningsförsök.

### C. Upplösningshastighet av bränslematrisen under olika redoxförhållanden

Projektet med lakning av radionuklider från använt bränsle och diffusion i bentonit har avslutats. Resultaten från undersökningar av aktiniders upplösning och transport i bentonitlera har publicerats /4-13/, liksom en sammanställning av metoderna för analys av de radioaktiva ämnena /4-14/.

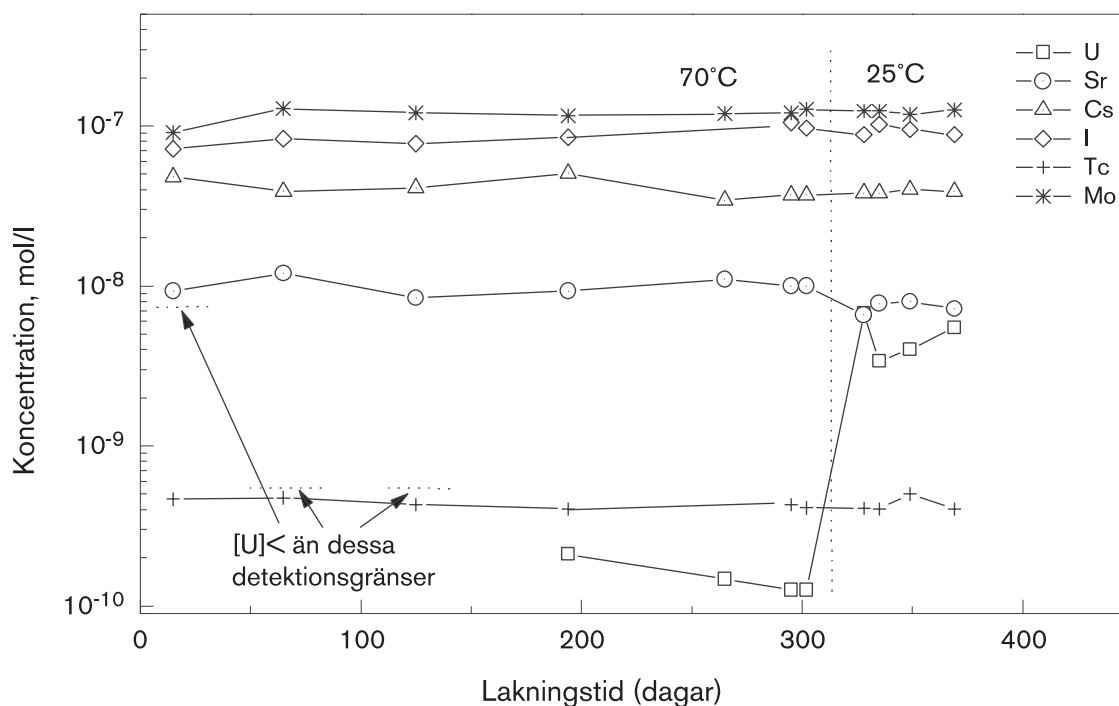
Redoxbetingelserna är avgörande för bränsleupplösningen. Processer och reaktioner som påverkar och påverkas av dessa måste därför karakteriseras. Här beskrivs först autoklavförsök av bränslelakning med väte under 5 MPa tryck (vattentrycket på 500 m djup) och sedan flödeslagningsförsök under oxiderande, reducerande och anoxiska förhållanden vid atmosfärstryck.

### Autoklavförsök vid 5 MPa vätetryck

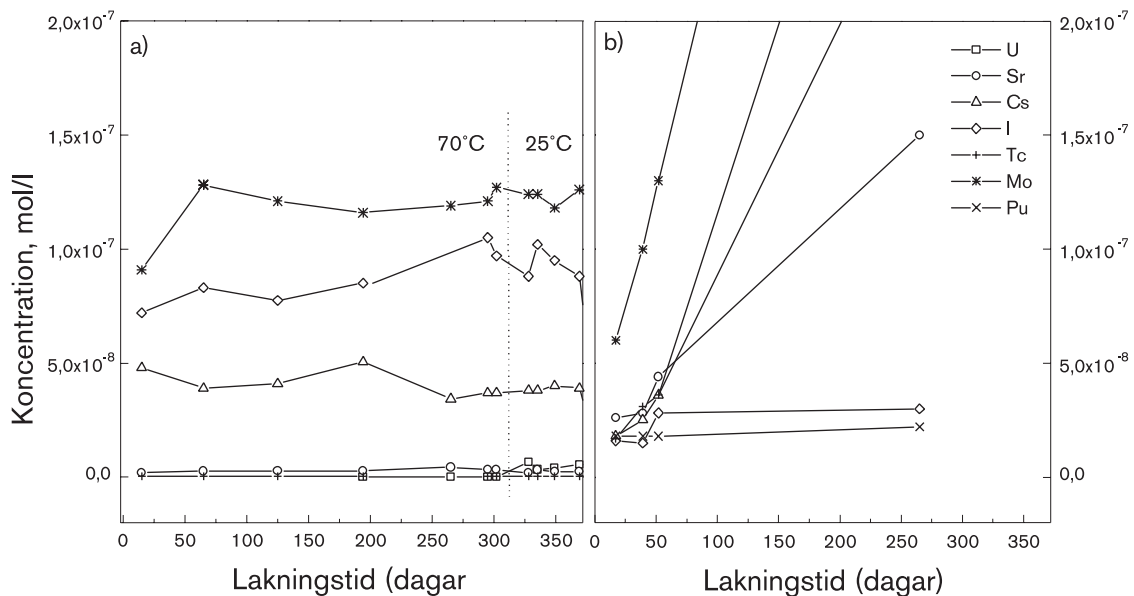
En potentiell reduktant är vätgas som bildas i stora mängder i en skadad kapsel framför allt vid korrosion av kapselns gjutjärnsinsats. Vid rumstemperatur kan väte bara reducera i närvaro av en lämplig katalysator. Det finns emellertid uppgifter i litteratur från andra forskningsområden (se /4-15/ för en sammanställning), att  $\text{UO}_2(\text{s})$ -ytan själv skulle kunna aktivera väte. Preliminära data från påverkan av 5 MPa vätetryck på bränsleupplösningen /4-4/ visas i figur 4-2.

Försöket genomfördes i ett enliters autoklav med 2 gram pulver av använt bränsle (0,25–0,5 mm; 295  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) i simulerat grundvatten med 5 MPa vätgastryck. Vattenprover på 10 ml togs ut vid olika tidpunkter under mer än ett år och analyserades. De uppmätta uranhalterna och även andra radionuklidernas halter var låga och konstanta inom analytiska felgränser. Uranhalten stämmer bra med de lägsta publicerade data för  $\text{UO}_2(\text{s})$  löslighet vid motsvarande temperatur /4-16, 4-17/. Detta tolkas som att allt uran i lösningen är U(IV). Detta är anmärkningsvärt eftersom bränslet kontinuerligt radiolyserar vatten och producerar syre. Om uran och andra redoxkänsliga element först löstes upp från bränslet genom inverkan av radiolytiskt syre, och sedan reducerades t ex vid autoklavens yta, borde halterna av icke redoxkänsliga element som cesium och strontium från bränslematrisen öka med tiden. Detta syns tydligare i figur 4-3, där data för lakning i vätgasatmosfär jämförs med data från lakning under anoxiska (argon) förhållanden. Vid detta försök användes argon vid atmosfärstryck i stället för vätgas och bränslekutsar i stället för bränslepulver. De konstanta uppmätta halterna av alla bränslekomponenter under mer än ett år tyder på en hög stabilitet av bränslematrisen i närvaro av löst vätgas.

Data för anoxiska förhållanden tyder på en relativt snabb upplösning, nära den för oxiderande förhållanden. Observera dock att försöksuppställningen inte är syretät (se ovan), vilket gör att siffran kan vara en överskattning. Vid vätgasförhållanden kan ingen upplösning utläsas efter den första mätpunkten. Givet tiden för försöken och noggrann-



**Figur 4-2.** Uppmätta halter av U, Sr, Cs, I, Tc, och Mo som funktion av laktid för vätgaslakning under högt tryck (5 MPa  $\text{H}_2$ ) av använt bränslepulver i en 10 mM NaCl, 2 mM  $\text{HCO}_3^-$  lösning vid 70 °C och 25 °C.



**Figur 4-3.** Jämförelse av koncentrationsförändringar med tiden för lakning vid SMPa vätgastryck (2a) och lakning (2b) av använt bränsle under anoxiska förhållanden. Data visas i linjär skala för att förenkla jämförelsen.

heten i koncentrationsbestämningen tyder en preliminär analys av data på en övre gräns för bränsleupplösningen på andelen  $5 \cdot 10^{-8}$  per år. Siffran bygger dock på ett enda försök med en autoklav av rostfritt stål där ytorna inte var fullständigt rena. För att verifiera resultatet samt avgöra om bränslematrisupplösningen sker mycket långsamt eller avstannar helt måste noggrannheten i analyserna förbättras och försökstiden ökas ytterligare.

Vid de aktuella pH-värdena förväntas syre snabbt oxidera U(IV) till den betydligt mer lösliga U(VI). Försöket visar alltså att närvaron av vätgas tycks förhindra detta. Stabiliteten av bränslematrisen i närvaro av löst vätgas kan ha flera orsaker.

En tänkbar förklaring är att radiolytiska oxidanter neutraliseras i lösning /4-18, 4-19/, vilket antogs i den bränsleupplösningmodell som användes i SR 97.

En annan möjlig förklaring är en katalytisk aktivering av vätgas vid bränsleytan. Mer sofistikerade försök krävs för att påvisa en sådan effekt. Försök med lakning av urandioxid, Gd-dopad urandioxid eller SIMFUEL i närvaro av vätgas där små mängder <sup>18</sup>O<sub>2</sub> införs och följs i systemet är planerade liksom försök med urandioxid och låga halter syre och väte i gasfas, av den typ som genomförts för att bevisa PuO<sub>2</sub>(s) katalytiska effekt /4-20/.

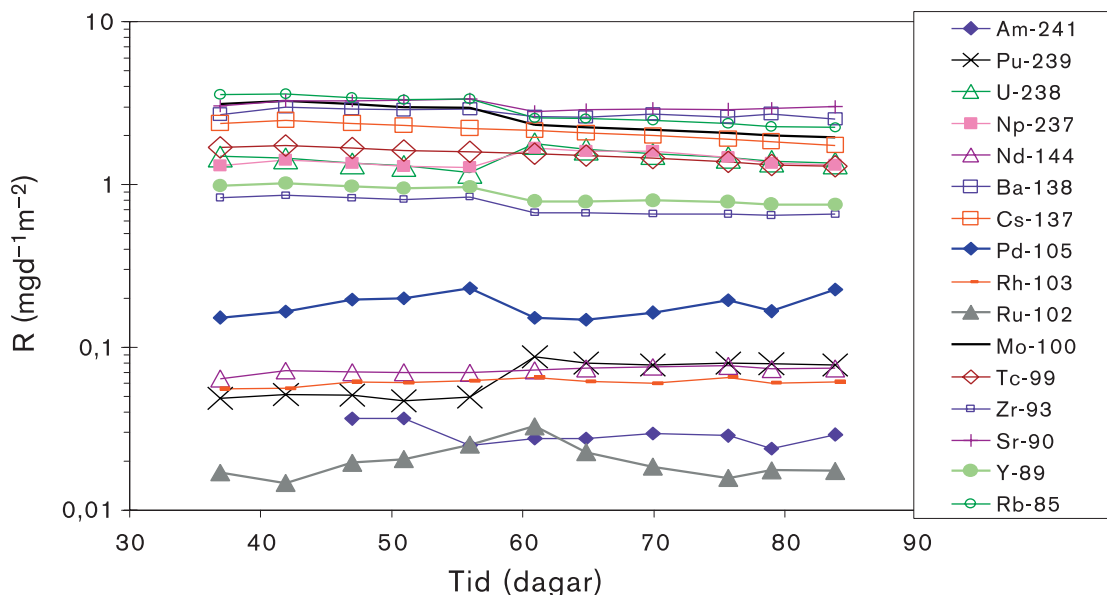
En studie av påverkan av gammarradiolys på urandioxid i 0,1 M NaCl-lösningar under 5 MPa vätgas eller argon har genomförts vid AECL, Kanada /4-21/. Mätningar av korrosionspotentialen för UO<sub>2</sub>(s) elektroder visar att vätgas inte bara skyddar urandioxid från radiolytisk oxidation, utan också skapar mer reducerande förhållanden än utan strålning. De kraftigt negativa korrosionspotentialerna (< - 800 mV vs SCE) betyder att det är omöjligt för en positiv jon att lämna en så negativt laddad yta (dvs ingen korrosion av urandioxid genom utsläpp av uranyljoner). Dessa slutsatser stöds också av XPS-analyser (X-ray Photo Electron Spectroscopy) av urandioxidytan före och efter försöket. Dessa visar en minskning av ytans oxidationstillstånd efter kontakten med vätemättade lösningar i närvaro av gammastrålning.

### Flödeslagningsförsök under varierande redoxförhållanden vid atmosfärstryck

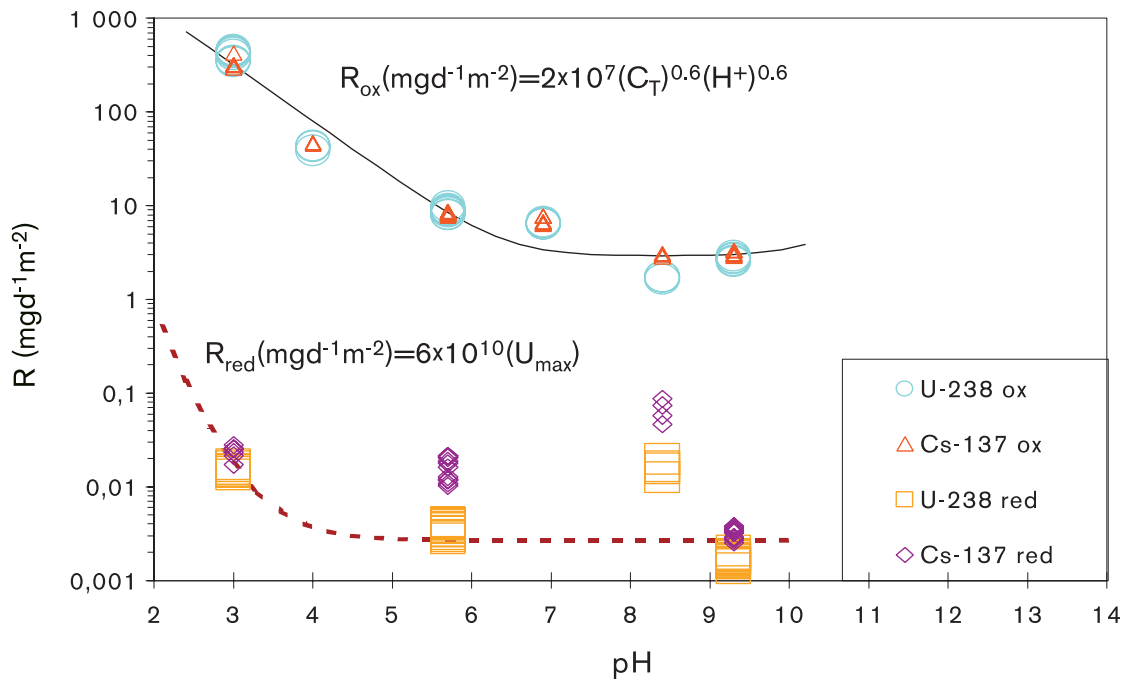
Vid en annan serie försök har flödesreaktorer använts för att studera bränsleupplösning under bl a oxiderande, anoxiska och reducerande förhållanden. Flödesreaktorer har tidigare utnyttjats i studier av upplösningskinetik för svårslösliga ämnen, inklusive studier av  $UO_2(s)$  och använt bränsle. Denna teknik har förbättrats och utprovats på Studsvik /4-22/. Först genomfördes en kritisk granskning av alla litteraturdata om upplösningshastigheter för urandioxid, SIMFUEL och använt bränsle /4-23/. Alla upplösta bränslekomponenter i laktlösningarna analyserades med ICP-MS, se ovan under "Analytiska metoder". Detta ger en bättre förståelse för bränsleupplösningskinetiken jämfört med andra bränslestudier, där bara uran och cesium analyserats. En HPLC-dubbelpistongpump användes istället för en peristaltisk pump; för reaktor, rör och packningar användes syretäta material för att minimera syrediffusion. Redoxpotential och pH uppmättes kontinuerligt före och efter bränslereaktorn under försöket. För att få en bättre förståelse för påverkan från karbonat och pH på bränsleupplösningskinetiken genomfördes försök i pH-intervallet 3 till 9,2.

De uppmätta bränsleupplösningshastigheterna under oxiderande förhållanden (luftmättade lösningar) stämmer väl med publicerade data. Resultaten gör det också möjligt att dra en del slutsatser /4-22/ om kongruens vid matrisupplösning för olika bränslekomponenter, se figur 4-4.

De uppmätta bränsleupplösningshastigheterna minskade upp till fyra storleksordningar i simulerade grundvattenlösningar mättade med 1 atm vätgas (figur 4-5). Eftersom vätgas vid rumstemperatur är kemiskt trög, tyder detta på att löst vätgas aktiveras i närvaro av använt bränsle, vilket var en av de tänkbara förklaringarna till den observerade stabiliteten hos bränslet i högtrycksförsöket ovan.



Figur 4-4. Inventarienormerad upplösningshastighet (R) för olika bränslekomponenter i 10 mM  $NaHCO_3$ -lösningar under oxiderande förhållanden (luftmättade lösningar).



**Figur 4-5.** Upplösningshastigheter baserade på U-238 och Cs-137 för olika pH, under oxiderande (luft) och reducerande (vätgas) förhållanden. Med  $C_T$  menas den totala karbonathalten.

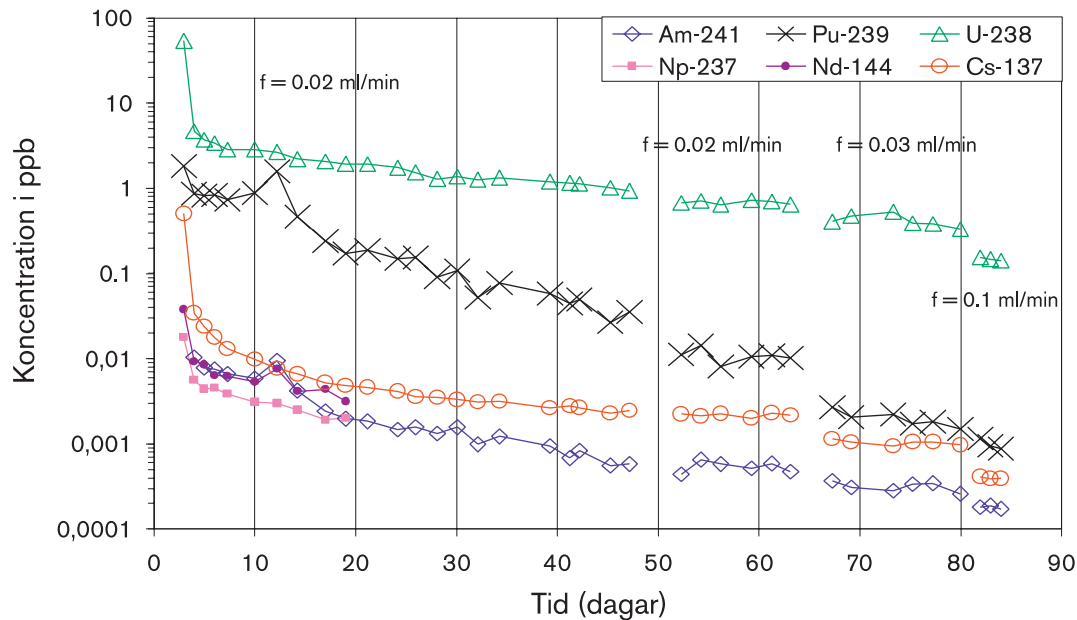
Vid andra flödeslagningsförsök med urandioxid i stället för använt bränsle /4-24/ och vätgasmättade lösningar erhöles betydligt högre uranhalter. En orsak kan vara att i det fallet användes en peristaltisk pump och plaströr, så att syrediffusionen antagligen var avsevärt högre. Det är också möjligt att skillnaden beror på effekten av kombinationen av strålningen från använt bränsle och vätgas. För att avgöra detta kommer flödesförsöken med använt bränsle att upprepas med urandioxid.

Vid Studsviksförsöken ökade upplösningshastigheterna markant vid låga pH och oxiderande förhållanden, men var nästan pH-oberoende för  $\text{pH} > 4$  vid reducerande förhållanden. Upplösningshastigheterna kunde anpassas väl till ett kinetisk uttryck av typen

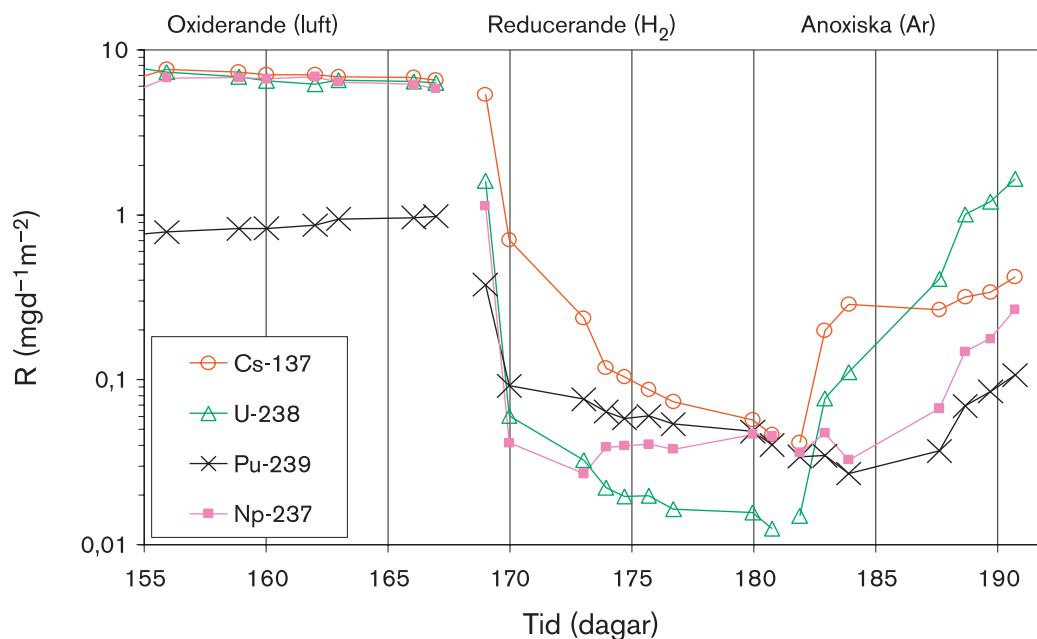
$$R_{\text{red}} = k [U_{\text{max}}],$$

där  $[U_{\text{max}}]$  är lösligheten för  $\text{UO}_2(\text{s})$  vid givet pH. Detta indikerar en icke oxiderande upplösning av bränslematrisen, vilket förklaras utförligare i /4-22/.

De uppmätta halterna av vissa bränslekomponenter i närvaro av löst vätgas var så låga (mindre än 0,001 ppb), att det var omöjligt att analysera exempelvis neptunium efter en viss laktid, se figur 4-6. I figur 4-7 jämförs data från bränslelakning vid pH 8,2 för oxiderande (luft), reducerande ( $H_2$ ) och anoxiska (Ar) förhållanden. Vätgaseffekten syns tydligt, speciellt efter byte av vätgas mot argon. Då tar syre från radiolys och diffusion över och bränslematrisen löses upp med hastigheter som närmar sig de som uppmäts vid oxiderande förhållanden.



**Figur 4-6.** Uppmätta halter av olika bränslekomponenter vid flödeslakning med en 10 mM  $NaHCO_3$  lösning mättad med  $H_2(g)$ .



**Figur 4-7.** Inventarienormerade upplösningshastigheter ( $R$ ) baserade på olika radionuklider för en 1 mM  $NaHCO_3$  testlösning vid oxiderande, reducerande och anoxiska förhållanden.



## ***Forskningsprogram***

För att utesluta påverkan från autoklavytter, har nya autoklaver med inre kvartsytter inköpts för kommande försök. En parameterstudie av betydelsen av temperatur och vätgastryck i lakningen har påbörjats.

Flödeslakningsapparaten har monterats i en argonfylld handskbox för att ytterligare minska syrediffusion. Lakningar av bränsle i anoxiska (Ar) och reducerande ( $H_2$ ) förhållanden, samt lakning av urandioxid vid reducerande förhållanden är planerade.

Försök med Ar + 0,03 procent  $CO_2$  och Ar + 10 procent  $H_2$  + 0,03 procent  $CO_2$  atmosfärer ska genomföras med bränslekutsar i hotcell. Gasrör av metall och bättre tätning i mätsystemet förväntas minska indiffusionen av syre. Resultaten ska också visa om så låga halter löst vätgas har någon effekt på lakningsprocessen.

I CHEMLAB-sonden vid Äspö kommer bränsleupplösning vid förvarsförhållanden att studeras. Experiment kommer att kräva omsorgsfull radiologisk kontroll vid förberedelser, genomförande och tillhörande transporter. Den exakta tidsåtgången kan inte beräknas förrän dessa frågor har utretts. Det är rimligt att anta en experimenttid av tre till fem år. Målet är att kunna påbörja experimenten med använt bränsle under år 2003.

## **D. Naturliga analogier**

De naturliga, fossila kärnreaktorerna i Oklo, Gabon har studerats som naturliga analogier till använt kärnbränsle i en geologisk miljö. För dessa studier är reaktorernas historik sedan de bildades viktig. Geologisk och geokronologisk information om Okloreaktorerna och den omgivande malmen har publicerats /4-25/. I rapporten beskrivs i kronologisk ordning processerna som ledde till uranmineraliseringen i Oklo, kärnreaktionerna, samt senare påverkan på reaktorerna. En diskussion av senare påverkan koncentreras kring intrusionen av diabasgångar, eftersom denna händelse hade en kraftigt effekt på Okloreaktorerna. En studie av migration av några element, som är naturliga analogier av radionuklider (REE, Th, U, Zr och Pb), i fjärrområdet av Okloreaktorerna har också publicerats /4-26/.

SKB har stött en avhandling inom detta område som inom kort kommer att framläggas vid Stockholms Universitet.

## **E. Radiolys**

Massbalansförsök, där tidsberoendet för bildning av väte och syre studerats i ett slutet system med cirka 2 gram bränslefragment och initialt syrefria lösningar, har genomförts under perioden. Syre och väte i gasfasen mättes vid olika tidpunkter med gasfaselektroddetektorer. Vattenfasen analyserades med avseende på väteperoxid (luminiscensmätning) och uran vid försökens slut. Effekterna av olika halter karbonat och kloridjoner i lösningen har studerats. Bearbetning av data från analys av lösningarna tyder på att lösningens sammansättning har stor inverkan på uranhalten.

För att möjliggöra massbalansberäkningar i lakförsöken har ett nytt lakningssystem, som medger samtidig analys av både gasfas och lösning, konstruerats och testas. Resultaten från tidsupplösta försök visar att förbrukningen av oxidanter i destillerat vatten sker genom reaktioner med bränsleytan och bildning av ett oxiderat  $UO_{2+x}$ -skikt, och i karbonatlösningar genom bildning av lösliga U(VI)-karbonat komplex. Eftersom analys av gasfasen under försökets gång alltid innebär en risk för läckage och förlust av radio-

lysgaser, speciellt när halterna med tiden blir stora, har långtidförsök med igensmälta glasampuller också genomförts. Resultat från de första ampullerna, som smältes med en gasbrännare, har publicerats tillsammans med tidsupplösta försök /4-27/.

Eftersom små mängder föroreningar kan introduceras i ampullerna från gasbrännaren, har en ny serie ampuller smälts med hjälp av en liten högtemperaturugn. I försöksserien varieras bränslefragmentets storlek (yta/volym förhållande) och lösningens sammansättning (klorid och karbonathalter). Ampullerna ska öppnas och analyseras för radiolysprodukter ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ ) och upplösta bränslekomponenter (ICP-MS) efter ett eller två år.

I samarbete med ITU, Karlsruhe, har alfadopad urandioxid syntetiserats. Detta material liknar gammalt bränsle, där i stort sett bara alfastrålning finns kvar. De första resultaten från lakning av  $UO_2$  dopad med alfaaktiviteter motsvarande 1 000 till 100 000 år gammalt bränsle visar att uranupplösningen var högre vid de högsta alfaaktiviteterna, samt att redoxförhållanden har en stor betydelse i lakningen av urandioxid med lägre alfaaktiviteter /4-28/. Massbalansförsök liknande de som genomförs vid Studsvik med använt bränsle, men med alfadopad urandioxid, förväntas möjliggöra en jämförelse av effekterna av olika typer av radiolys.

#### **F. Bränsleupplösning i säkerhetsanalysen – sammanfattning**

I djupförvaret förväntas kraftigt reducerande förhållanden. Om en kapsel skadas och vatten tränger in kommer sannolikt gjutjärnsinsatsen att korrodera under vätgasproduktion. Vätgastrycket kan förväntas vara minst lika med vattentrycket på förvarsnivå (omkring 5 MPa) under mycket lång tid.

Detta gör att de bränsleupplösningshastigheter som observeras vid autoklavförsök i närvaro av 5 MPa väte idag bedöms vara de mest realistiska för djupförvaret, så länge vätgasproduktionen pågår. Resultaten från ett första experiment under sådana förhållanden pekar på en mycket långsam eller obefintlig upplösning.

Då väte inte längre kan förväntas produceras eller finnas kvar i kapseln blir de experimentella observationerna för anoxiska förhållanden med flödesreaktorer de som bedöms kunna ge en övre gräns för bränsleupplösningshastigheten. Inför kommande säkerhetsanalyser krävs en grundlig genomgång av experimentella resultat i syfte att finna försvarbara beskrivningar av bränsleupplösningen vid olika förhållanden i kapselns inre.

#### **4.2.13 Lösning av gapinventarium**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Radionuklider i material som utskiljts till gapet mellan bränsle och kapslingsrör kommer snabbt att gå i lösning. Mängden frigjord aktivitet bestäms av lösligheten och tillgängligheten på utskiljt material. Frigörelsen från gapet är oberoende av upplösningen eller omvandlingen av urandioxiden i bränslet.

I SR 97 antogs att gap- och korngränsinventarierna frigörs omedelbart när bränslet kommer i kontakt med vatten. Detta är pessimistiskt, men bedöms ligga ganska nära verkligheten i de tidskalor som beaktas.

Myndigheterna anser att det finns flera goda skäl att använda sig av det förenklade antagandet att både frigörelse från korngränser och metalldelar sker helt momentant.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

Ytterligare insatser kommer däremot att göras för att förbättra dataunderlaget, se avsnitt 4.1.8.

## **4.2.14 Speciering, kolloidbildning**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Från myndigheternas granskning av SR 97: "Även om de i SR 97 beräknade lösligheterna troligtvis är konservativa anser myndigheterna liksom flera av SKI:s konsulter att metoden för löslighetsberäkningar kan förbättras. Vissa utgångspunkter för löslighetsberäkningar kan bli tydligare i kommande analyser, t ex hantering av data, propagering av osäkerheter samt uppskattning av porvattensammansättningar i bentonitbufferten. Myndigheterna rekommenderar vidare SKB att utvärdera vilka porvattensammansättningar som kan förväntas inuti en havererad kapsel, eftersom SKB förutser ett mycket begränsat utbyte mellan en defekt kapsel och omgivande buffert. Processer som påverkar porvattensammansättningen inuti en havererad kapsel innefattar t ex bränsleupplösning, radiolys eller korrosion av järninsatsen."

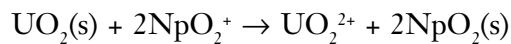
### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

I scenariot med en skadad kapsel är redoxförhållandena i närområdet betydelsefulla. Aktiniderna som finns i bränslet har till exempel en betydligt lägre löslighet i fyrvärda tillstånd än i fem- eller sexvärda. 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 kan påverkas på liknande sätt och oxideras till högre valenstillstånd, med ökad löslighet som följd.

Vid Studsvik har man visat att uranyljoner reduceras på järnytor och fälls ut som urandioxid /4-29/. Detsamma gäller för mineralen pyrit ( $\text{FeS}_2(\text{s})$ ) /4-30/ och andra Fe(II) mineraler som finns t ex i bentonitbufferten eller i berg /4-31/. Det är termodynamiskt möjligt att reducera Np(V) med  $\text{UO}_2(\text{s})$ , dvs  $\Delta G$  för reaktionen:



är negativ /4-32/, men det fanns inget bevis för att detta är kinetiskt möjligt. Under perioden har man på Chalmers visat att Np(V) reduceras och fälls ut vid ytan av urandioxid /4-33/. Samma sak borde gälla för Pu(V eller VI), som är mindre stabila än Np(V). På så vis skulle den inre järnkapseln eller redoxfronten (i bentonit eller berg) kunna ta hand om frisläppta aktinider och fungera som kemisk barriär.

En annan komponent i närområdet är gjutjärn och dess korrosionsprodukter. I närvaro av grundvatten är järnytan belagd med järnkorrosionsprodukter från reaktion med vatten. En studie av gjutjärnkorrosion och dess växelverkan med U(VI) i anoxiska grundvatten vid 20 °C har avslutats /4-29/. Efter tre månader identifierades med röntgendiffraktion ett skikt av en mörkgrön järnkorrosionsprodukt som karbonatgrönrost,  $\text{Fe}^{\text{II}}_4\text{Fe}^{\text{III}}_2(\text{OH})_{12}\text{CO}_3(\text{s})$ . I ett annat tremånaders försök med samma anoxiska grundvatten, men från början innehållande 10 ppm U(VI), identifierades  $\text{UO}_2(\text{s})$  och karbonatgrönrost vid järnytan med röntgendiffraktion. SEM-EDS-analyser visade att ett tunt (0,2  $\mu\text{m}$ ) uranskikt deponerats ovanpå grönrostskiktet, och några  $\text{UO}_2(\text{s})$  kristaller (3–5  $\mu\text{m}$ ) observerades vid ytan.

Vid högre temperatur är den stabila järnkorrosionsprodukten magnetit /4-34/. Interaktionen mellan den syntetiska magnetitytan och U(VI) upplösta species har studerats som funktion av karbonathalt, total uranhalt och yta/volym förhållandet vid neutrala pH-värden /4-35/. Uranhaltminskning i lösning är högre vid låga karbonathalter, men det finns nästan ingen effekt vid höga karbonathalter på grund av det starka U(VI)-karbonat-komplexet. Ett magnetitskikt bildat vid gjutjärnsytan borde ha starkare reducerande egenskaper än en ren magnetitfas, eftersom magnetit har halvledaregenskaper /4-32/. Preliminära data från försök med gjutjärnbitar där magnetit har identifierats med röntgendiffraktion och XPS, visar betydligt högre reduceringsförmåga för upplöst U(VI) /4-36/.

På senare tid har studier i FZK Karlsruhe genomförts, där man har bestämt relativt låga lösligheter av fyrvärda aktinidoxider, t. ex. Th(IV), vid de pH-värden där man detekterar kolloidbildning i lösningen /4-37, 4-38/. Detta betyder att de ofta diskuterade aktinid(IV)-kolloiderna inte kan bildas från undermättad, dvs vid upplösning av använt bränsle. De kan bildas i försökskärlet när man tillsätter en relativt koncentrerad alkalilösning i en millimolarlösning av aktinid(IV), därför att stark övermättad sker där en droppe alkalisk lösning faller i aktinid(IV)lösning.

### **Forskningsprogram**

Ett långsiktigt forskningsprogram kommer att startas för att undersöka lösligheten av fyrvärda aktinidoxider från undermättad. Samtidigt genomförs oxidationstalspeciering och karakterisering av fasta faser. Löslighetsberäkningar för SR 97 antyder att plutonium i vissa grundvatten kan existera som Pu(III). Eftersom nästan inga data finns för löslighetsbegränsande faser av Pu(III) i litteraturen, ska under de kommande åren lösligheten för  $\text{PuO}_2(\text{s})$  i vätgasmättade lösningar studeras. Studier för att identifiera löslighetsbegränsande faser av Pu(III) och deras löslighet ska också genomföras.

I CHEMLAB-sonden vid Äspö påbörjas radiolysexperiment med Tc under 2001 och beräknas pågå till slutet av 2002. I detta experiment simuleras hur radiolys orsakad av strålningen från bränslet påverkar specieringen av Tc(IV).

För kommande säkerhetsanalyser planeras samma typ av löslighetsberäkningar som för SR 97, men med en moderniserad databas. För analys av vilka kemiska förhållanden som kan förväntas i kapselns omgivning, se avsnitt 6.2.23.

#### **4.2.15 Heliumproduktion**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Alfapartiklar (heliumkärnor) från alfasönderfall i bränslet bildar gasformigt helium sedan de bromsats i bränslematrisen. Detta leder till en tryckuppbyggnad innanför röret kring en bränslestav med intakt kapslingsrör. Tryckuppbyggnaden kan i sin tur leda till mekaniskt rörbrott. Om kapslingsrören är skadade uppstår en försumbar tryckökning i kapselns hålrum. Tryckökningen ligger i området 10 till 20 MPa på 100 000 år beräknat på en tomvolym av 20 cm<sup>3</sup>. Om detta övertryck leder till brott på kapslingsrören skulle tryckökningen i tomrummet i kapseln bli i storleksordningen 0,1 MPa, vilket är helt försumbart.

Processen kommenterades inte i granskningen av SR 97.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

##### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

##### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.



## 5 Kapsel

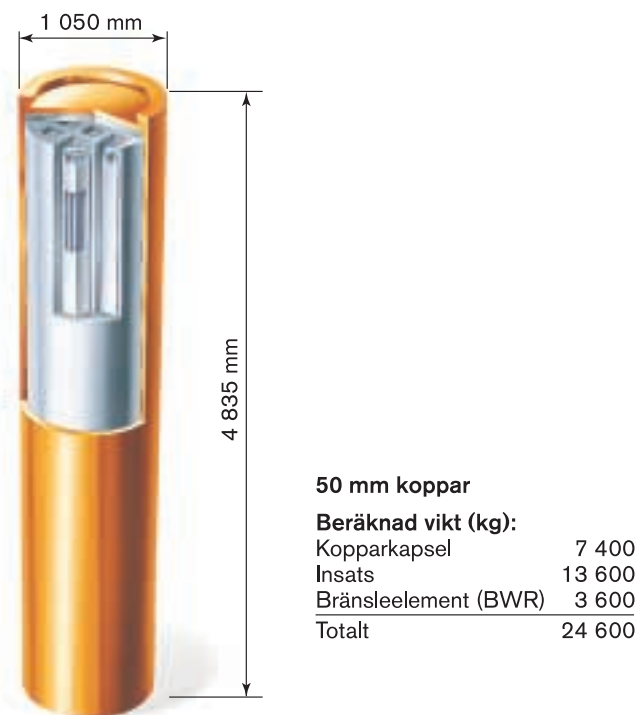
SKB:s referenskapsel, se figur 5-1, består av en inre behållare av gjutjärn och ett hölje av koppar. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön.

Preliminära konstruktionsförutsättningarna för kapseln redovisades i FUD-program 98 samt i /5-1/ och /5-2/. Konstruktionsförutsättningarna för hela djupförvaret ställs för närvarande samman. De slutgiltiga konstruktionsförutsättningarna för kapseln kan komma att skilja sig något från de preliminära och därigenom leda till förändringar av kapselutformningen på någon punkt. En första version av hela förvarets konstruktionsförutsättningar kommer att redovisas, se vidare avsnitt 14.2.1.

Referenskapseln beskrivs mer i detalj i kapitel 15, liksom utvecklingsprogrammet för dess tillverkning. Här följer en kort sammanfattning av de viktigaste egenskaperna, tillverknings- och testmetoderna.

Insatsen har kanaler där bränsleelementen placeras och finns i två utformningar; en för tolv BWR-element och en för fyra PWR-element. Kapseln väger totalt cirka 25 ton fylld med tolv BWR-element. En kapsel rymmer cirka två ton bränsle.

Bränslekanalerna i insatsen tillverkas i form av en kassett av kvadratiska rör. Därefter tillverkas innerbehållarens väggar och botten genom att gjuta in kassetten i segjärn.



*Figur 5-1. Kopparhöljet är 50 mm tjockt och kapseln har formen av en cirka 4,8 meter hög cylinder med en diameter av 1,05 meter.*

Kopparkapseln tillverkas antingen av heldragna sömlösa rör eller genom att svetsa samman två rörhalvor av valsad plåt. En botten svetsas fast antingen med elektronstrålesvets eller genom friction stir welding, i båda fallen så att svetsen kan undersökas med oförstörande provning.

Efter att bränsle har deponerats i kapseln försluts insatsen med ett lock som skruvas fast. Därefter svetsas kopparhöljets lock och tätheten kontrolleras med oförstörande provning.

Tre metoder för oförstörande provning utvecklas. Med röntgenradiografi upptäcks pordefekter, med ultraljud detekteras även defekter som inte upptar volym, till exempel bindfel och med virvelströmsprovning avslöjas ytnära defekter.

Acceptanskriterier kommer att fastställas för kapselns alla delar inklusive svetsarna. För bl a svetsarna måste man med provmetoderna kunna avgöra om acceptanskriterierna är uppfyllda.

Under de närmaste åren ska förvarsutformningen anpassas till de förhållanden som råder på de platser som valts för platsundersökningar. I FUD-program 98 aviserade SKB att tjockleken på kopparhöljet är en av de delar som kan bli föremål för en sådan anpassning.

I grunden finns ett krav på en minsta tjocklek med hänsyn till kravet på att kapseln ska vara tät under lång tid och de korrosionsprocesser som kan tänkas pågå. FUD-program 98 angav att koppartjockleken måste vara minst 15 mm för att ge det korrosionsskydd som krävs. Konservativa uppskattningar visar att denna tjocklek ger en säkerhetsfaktor tre mot korrosionsgenombrott i ett 100 000-årsperspektiv.

För att förbättra kapselns utformning måste kraven på korrosionsbeständighet, mekanisk hållfasthet och kraven när det gäller metoder för tillverkning och hantering tillgodoses. I FUD-program 98 angavs en koppartjocklek på 30 mm som ett möjligt resultat från en sådan sammanvägning. Tillverkningsprov har därför genomförts.

Arbetet med kapselutveckling och kapselutformning kommer även under nästa period att omfatta en tunnare kapsel. Insatsens tjocklek ökas i motsvarande grad. Fördelarna med ett tunnare kopparhölje är:

- Den koppartjocklek som behövs för att garantera tillräckligt skydd mot korrosion är mindre än en centimeter /5-3/. Ett tjockare kopparhölje bidrar marginellt till ökad säkerhet.
- Insatsens mekaniska hållfasthet förbättras.
- Reduktionsgraden ökar vid tillverkning av kopparrör med de aktuella metoderna och man får därigenom bättre kontroll över mikrostrukturen i materialet. En nackdel är dock att tunnare väggar leder till minskad mekanisk stabilitet hos kopparcylindern. Om detta kan försvåra bearbetning och hantering är inte klarlagt.
- Förslutningen av kapseln förenklas med tunnare gods. Även om de tekniker som SKB utvecklat för svetsning i tjock koppar, elektronstrålesvetsning och friction stir welding fungerar bra för 50 mm koppar förväntas tillförlitligheten och kvaliteten på svetsen att bli ännu högre med tunnare gods.
- Oförstörande provning med både ultraljud och radiografi förenklas vid tunnare gods. För ultraljud är vinsterna mer marginella vid elektronstrålesvetsning, eftersom mikrostrukturen i svetsen dominerar bakgrundsbruset i ultraljudsignalen. För radiografi ökar detekterbarheten för diskontinuiteter och det blir eventuellt möjligt att reducera röntgenenergin och därigenom förenkla radiografiutrustningen och minska kraven på strålskärning i inkapslingsanläggningen.



## 5.1 Initialtillstånd för kapseln

### 5.1.1 Variabler

Tabell 5-1 visar den uppsättning variabler som användes i SR 97 för att beskriva kopparkapseln och gjutjärnsinsatsen.

Initialtillståndet, dvs värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 6.3. I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i kapseln.

**Tabell 5-1. Variabler för kopparkapsel/gjutjärnsinsats.**

Variabel	Definition
Geometri	Geometriska mått för kapselkomponenterna. Här ingår även en beskrivning av eventuella tillverkningsfel vid svetsning o dyl.
Strålintensitet	Intensitet av $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ 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.

### 5.1.2 Geometri

Utöver kapselns geometriska form ingår i SR 97 även eventuella initiala defekter i förslutningen i variabeln kapselgeometri.

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

SKB anger att kravet med hänsyn till initiala defekter är att högst 0,1 procent av kapslarna får ha större fel än vad acceptanskriterierna för den oförstörande provningen tillåter. Enligt myndigheternas uppfattning återstår det dock för SKB att visa att detta är ett tillräckligt och realistiskt mål. Myndigheterna konstaterar också att acceptanskriterierna inte är specificerade.

Kasam menar att SKB bör skaffa underlag för realistiska antaganden om initiala kapseldefekter.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI anser inte att påståendet att man med tillgängliga metoder för provning kan uppnå kriteriet högst 0,1 procent defekta kapslar har bevisats i FUD-program 98. SKI anser vidare att SKB måste ta fram en härledning av acceptanskriterier för tillåtna defekter. Den skall utgå från säkerhetsanalysen; konsekvenser ska visas för vad som händer om det finns fler eller större defekter i både kapselmaterialet och i svetsen än vad acceptanskriterierna anger.

## **Forskningsprogram**

Arbetet med kapseltillverkning och provning beskrivs i kapitel 15. Arbetet kommer under nästa period att omfatta även en kapsel med 30 mm kopparhölje.

SKB har startat ett forskningsprogram för att i en första fas fastställa acceptanskriterier och i ett senare skede arbeta mot kvalificering av utrustningar för oförstörande provning. Utvärderingen av provsvetsningar vid Kapsellaboratoriet kommer att ge information om de typer av fel och även frekvensen av fel som elektronstrålesvetsning och friction stir welding kan ge upphov till.

I kommande säkerhetsanalyser bör antaganden om initiala defekter vara mer direkt kopplade till resultaten av utvecklingsarbetet vid Kapsellaboratoriet och vid utformning av tillverkningsmetoder. Härledning av indata till säkerhetsanalysen ur teststatistik från den oförstörande provningen och de uppsatta acceptanskriterierna ska genomföras gemensamt av representanter för säkerhetsanalys, forskning och teknikutveckling. Både skadefrekvenser och skadetyper behöver behandlas.

### **5.1.3 Strålintensitet**

#### ***Slutsatser i SR 97 och FUD 98 samt i granskningarna av dessa***

SKB:s kriterium är att ytdosraten på kapseln inte får överstiga 1 Gy/h. Detta kriterium är uppfyllt för såväl kapseln som beskrevs i SR 97 som för den möjligen förändrade kapseln, där den lägre stråldämpningen i ett tunnare kopparhölje kompenseras av en kraftigare dämpning i en tjockare gjutjärnsinsats.

#### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

## **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

### **5.1.4 Temperatur**

Här avses kapselns initiala temperatur, dvs temperaturen omedelbart efter deponering. Denna variabel ingår formellt i initialtillståndet, men föranleder inga forskningsinsatser. Kapselns temperaturutveckling uppskattas i en integrerad temperaturmodellering av förvarets närområde.

### **5.1.5 Mekaniska spänningar**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

De restspänningar i förslutningssvetsen som kan kvarstå efter mycket lång tid är låga och bedöms inte ha någon betydelse för kapselns livslängd. Inga kommentarer från myndigheterna har noterats.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Frågan är inte behandlad.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

## **5.1.6 Materialsammansättning**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Insatsen består av segjärn EN-GJS-400-15 och kopparhöljet av ASTM UNS C10100 med tillsats av 50 ppm fosfor. Inga kommentarer rörande materialvalet noteras från myndigheterna.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI finner SKB:s beskrivning av valet av koppar som kapselmaterial både strukturerat och motiverat. Motiven är beskrivna med utgångspunkt från såväl kraven på kemisk beständighet och mekanisk hållfasthet som från en genomgång av hur och om andra konstruktionskrav påverkar materialvalet.

Det finns dock osäkerheter kring mekanismerna varmed fosfor påverkar koppars kryp-egenskaper. Detta diskuteras vidare i avsnitt 5.2.5.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Nya resultat vad gäller kapselutformningen redovisas i kapitel 15.

### **Forskningsprogram**

Kommande arbete vad gäller kapselutformningen redovisas i kapitel 15.

## **5.2 Kapselprocesser**

### **5.2.1 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.

Mekaniskt kan insats och kapsel deformeras av yttre laster. Dessutom förekommer termisk expansion som bl a leder till att hålrummet mellan insats och kapsel förändras.

En viktig kemisk process är utvändigt kopparkorrosion, men även spänningskorrosion skulle kunna förekomma i såväl kopparkapsel som gjutjärnsinsats. Materialen kan förändras av strålpåverkan. Om vatten tränger in sker korrosion av gjutjärnsinsatsen med åtföljande vätgasbildning och galvanisk korrosion.

Radionuklidtransport i kapselns hålrum behandlas i avsnitt 7.3.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i kapseln.

## **5.2.2 Stråldämpning/värmealstring**

### ***Slutsatser i SR 97 och FUD 98 samt i granskningarna av dessa***

SKB anser att förståelsen och tillgången på data är tillräckliga för säkerhetsanalysens behov.

Myndigheterna instämmer i dessa slutsatser. De fysikaliska förlopp som här avses (radioaktivt sönderfall och absorption av strålning) är enligt myndigheternas uppfattning bland de mest väl kända av de processer som behöver beaktas i en säkerhetsanalys.

### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **5.2.3 Värmetransport**

Värmetransporten i kapseln behandlas integrerat med bränslets temperaturutveckling, se avsnitt 4.1.4.

## **5.2.4 Deformation gjutjärnsinsats**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Kollapstrycket vid isostatisk belastning för PWR- och BWR-varianterna av kapselinsatsen hade i SR 97 beräknats till 114 MPa respektive 81 MPa. Beräkningarna var genomförda för en kapselinsats i homogent gjutjärn och bedöms vara tillförlitliga under dessa förutsättningar. Osäkerheterna vad gäller kapselns hållfasthet kom från möjliga avvikelser, som kan ha orsakats av icke upptäckta gjutfel eller avvikelser från tabellvärdena för materialens egenskaper för segjärnet.

Diskussionen om hållfastheten vid tektoniska berg rörelser kring deponeringshållet baseras i SR 97 på en tidigare beräkning med ofullständiga buffertdata och för en klenare kapsel.

Myndigheterna instämmer i bedömningen av behovet av beräkningar av det kritiska övertrycket med realistiska materialdata.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI anser att förutsättningarna för hållfasthetsanalyserna behöver klargöras i större utsträckning. Dessa är i viss mån beroende av bentonitens egenskaper och osäkerheter däri, varför en integration av kapsel- och buffertprogrammen är viktig. Dessutom behöver hållfasthetsanalyserna uppdateras med resultaten från undersökningar av de tillverkade kapslarnas verkliga materialegenskaper (defekter, kornstorlek, dimensioner etc). I konstruktionskraven bör tillåtna värden på påkänningar/töjningar och andra belastningar på konstruktionen anges tydligt och motiveras. Vidare ska säkerhetsfaktorer för de enskilda belastningsfallen motiveras utifrån de konsekvenser varje enskilt belastningsfall kan tänkas ha på kapselns integritet. Dessa ska sedan specificeras i konstruktionskraven. De belastningsfall som anses vara mindre sannolika och där säkerhetsfaktorer inte tillämpas, t ex inverkan under en förväntad islast, ska analyseras och motiveras särskilt.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Erfarenheterna från provtillverkningen av 17 insatser visar att avvikelser från tabellvärdena för gjutjärns kvaliteten kan vara betydande och den höga hållfasthet som citerades i SR 97 inte alltid kan uppnås. Kontrollberäkningar för en gjutjärnsinsats till en kapsel med 30 mm kopparhölje visar att hög hållfasthet kan uppnås med EN-GJS-400-15 men att variationerna i materialdata, framförallt duktiliteten, kan vara stora /5-4/. Det betyder att provtillverkningen hittills inte har visat att kapslar som klarar laster på 80 MPa alltid kan tillverkas. Den hållfasthet som angavs i FUD-program 98 i konstruktionsförutsättningarna, 45 MPa, kan emellertid fortfarande uppnås. Underlaget från provtillverkningen är fortfarande litet och det är möjligt att gjutningarna i framtiden kan ge jämnare kvalitet.

### **Forskningsprogram**

I takt med att nya materialdata tas fram kommer förnyade hållfasthetsberäkningar att göras. När materialdata från gjutningarna är bättre kända kommer även skadetålighetsberäkningar att genomföras för att definiera tillåtna defekter i gjutgodset. SKB kommer eventuellt att överväga provtillverkning i andra gjutlegeringar än EN-GJS-400-15 med syftet att kunna specificera en ny gjutlegering för kapselinsatsen.

När variationsbredden i materialdata blir bättre känd liksom frekvensen och arten av eventuella defekter i gjutgodset och metoder för oförstörande provning av gjutjärnsinsatsen utvecklats kommer SKB att utreda vilka säkerhetsfaktorer som ska tillämpas vid dimensioneringen av kapselinsatsen.

I samband med att materialdata för insatsen kommer fram kommer också nya beräkningar att göras av kapselns beteende vid skjuvrörelser i berget. I de tidigare beräkningarna från 1992 simulerades bergrörelsen på 0,1 meter under 30 dagar för en klenare kapsel än dagens. Syftet med den nya beräkningen är att försöka simulera en mer realistisk tidsskala och med den aktuella kapseln. Innan beräkningarna påbörjas måste nya materialdata för bentonit också tas fram, se avsnitt 6.2.9.

## **5.2.5 Deformation av kopparkapsel från yttre övertryck**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I modellstudien av hur spänningar och töjningar i kopparkapseln byggs upp, förutsatte SKB att fullt tryck var utbildat efter en timme. Eftersom trycket i förvaret troligen byggs upp under loppet av år är det mest troligt att kopparhöljet tar stöd mot insatsen genom kryp i stället för plastisk kollaps, som beräkningarna förutsätter. Myndigheterna anser att det bör redovisas tydligare hur denna förenkling inverkar på hur resultatet av studien kan tillämpas i det verkliga fallet.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Den mekanism varmed fosfor påverkar materialets krypegenskaper är inte klarlagd och SKI anser att denna fråga ska utredas och att SKB ska ta reda på om en förbättring av krypegenskaperna även omfattar krypbrottngränsen.

### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

Som ett första steg har en konstitutiv modell /5-5/ för plastisk deformation och kryp i koppar implementerats i ABACUS /5-6/.

Modellering genom ab initio-beräkningar av inverkan av fosfor och svavel på koppars mekaniska egenskaper har genomförts under de senaste tre åren /5-7, 5-8, 5-9/. Slutsatserna från modelleringarna är att bindningsenergin för ett svavel-vakanspar är stor (-0,46 eV). Växelverkan svavel-vakans och svavel-svavel i kopparmatrisen förefaller gynna utfällning av kopparsulfid, som är den mest troliga orsaken till försprödning. Inverkan av fosfor på försprödningen skulle vara relaterad till att fosfor konkurrerar med svavlet om vakanser och andra gitterdefekter.

Experimentella undersökningar har också genomförts sedan 1998. Andersson et al /5-10/ har genomfört en studie av inverkan av fosfor, svavel och kornstorlek på kryp i ren koppar. Resultaten visar att den gynnsamma påverkan på krypduktiliteten som fosfor har finns redan vid en inblandning på 30 ppm och förbättras sedan inte vid högre inblandningar.

### ***Forskningsprogram***

I takt med att krypdata för kapslar och lock blir tillgängliga kommer modellberäkningar att genomföras för realistiska belastningsfall.

De teoretiska studierna kommer att fortsätta åtminstone under det närmaste året, men beräknas kunna slutföras under perioden.

Ett program där krypegenskaperna hos grundmaterial, samt hos svetsar som gjorts med elektronstråle och friction stir welding, studeras startade under hösten 2000. Programmet löper över 2,5 år.

## **5.2.6 Termisk expansion (såväl gjutjärnsinsats som kopparkapsel)**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Skillnaderna i längdutvidgningskoefficient mellan gjutjärn och koppar kan leda till töjningar i kopparkapseln på mindre än 0,1 procent. Även om töjningarna blir något större vid hörn och andra diskontinuiteter är detta försumbart från hållfasthetssynpunkt, eftersom krypduktiliteten för kopparn är åtminstone 20 procent för koppar med kornstorlek mindre än 800 µm /5-10/.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **5.2.7 Deformation från inre korrosionsprodukter**

Konsekvenserna av deformation av kopparhöljet är i princip desamma oavsett orsakerna. Samma kunskaper behövs för denna process som för processerna som diskuterades i avsnitten 5.2.5 och 5.2.6.

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Uppbyggnaden av korrosionsprodukter i spalten mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet leder till en tryckuppbyggnad som resulterar i att kopparhöljet töjs och så småningom brister.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Se avsnitten 5.2.5.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitten 5.2.5.

## **5.2.8 Korrosion gjutjärnsinsats**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Om det finns en genomgående skada i kopparhöljet kan vatten rinna in i gapet mellan kapselinsats och kopparhölje och vidare in i insatsen för att där leda till anaerob korrosion med vätgas och magnetit som korrosionsprodukter. Anaerob korrosion av gjutjärn har studeras experimentellt och korrosionshastigheten är mycket låg, under en  $\mu\text{m}/\text{år}$ , även i det aggressivaste vattnet som provats. Korrosionshastigheten har visat sig vara oberoende både av vätgasstrycket och halten  $\text{Fe}^{2+}$  i systemet. Detta tyder på att korrosionshastigheten med största sannolikhet bestäms av transportegenskaperna i skiktet av korrosionsprodukter på järnytan.

Myndigheterna anser att korrosionen av gjutjärnsinsatsen behöver studeras ytterligare. SKI:s konsulter påpekar att andra korrosionsprodukter än magnetit, t ex siderit eller pyrit, skulle kunna bildas. Experiment där bildade korrosionsprodukter undersöks skulle vara av värde även för att styrka SKB:s åsikt att korrosionshastigheten styrs av transportegenskaperna hos magnetitskiktet.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Behandlas inte i FUD-program 98.

### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Viss ny kunskap om specieringen av järnkorrosionsprodukter beskrivs i avsnitt 4.2.14.

### ***Forskningsprogram***

I tidigare studier har magnetit påvisats som korrosionsprodukt /5-11/. Detta utesluter inte att andra korrosionsprodukter kan bildas när järn korroderar anaerobt i andra vatten. I samband med att vattenkemin blir mer känd för SKB:s kandidatplatser för djupförvaret kommer experimentella studier av anaerob järnkorrosion att genomföras i de relevanta grundvattnen. Under det närmaste året kommer de experimentella studierna att fortsätta i första hand med system där bentonit finns närvarande. Karakterisering av korrosionsprodukter kommer att ingå i alla planerade studier.

Resultaten av studierna används i en integrerad modellering av utvecklingen hos en skadad kapsels utveckling, se avsnitt 5.2.16.

## **5.2.9 Galvanisk korrosion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Om det inträngande vattnet är syrefritt kommer den galvaniska kopplingen inte att kunna öka korrosionshastigheten med mer än vad som motsvaras av den ökade arean för reduktion av vatten, som kopparkapseln bidrar med. Det motsvarar en möjlig fördubbling av korrosionshastigheten.



### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI anser det vara angeläget att SKB studerar korrosionsförloppet i spalten mellan järninsatsen och kopparkapseln. I detta sammanhang bör också frågor om galvanisk korrosion belysas, i det fall metallisk kontakt kan uppstå i spalten. Arbetet inom detta område bör också ha stark koppling till arbetet med säkerhetsanalysmodeller för utvecklingen hos en skadad kapsel.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

SKB gjorde 1994 en utredning av effekterna av galvanisk korrosion när kopparhöljet var genombrutet /5-12/. En experimentell studie av galvanisk korrosion i systemet järn/koppar under syrefria förhållanden beräknas starta under 2001 och vara avslutad till 2003.

## **5.2.10 Spänningskorrosion gjutjärnsinsats**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

SKB bedömer riskerna för spänningskorrosion som små, eftersom endast lokala områden i insatsen har dragspänningar.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Behandlas inte i FUD-program 98.

### **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **5.2.11 Strålpåverkan**

### **Slutsatser i SR 97 och FUD 98 samt i granskningarna av dessa**

I SR 97 drogs slutsatsen att effekterna av neutronbestrålningen är betydelselösa och helt kan försummas i en bedömning av kapselns funktion i förvaret.

SKI påpekar att inverkan av eventuell materialförsprödning på grund av strålning på kapselns mekaniska hållfasthet bör utredas ytterligare (se också avsnitt 5.2.5).

## **Nyvvunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98**

En utredning av riskerna för strålningsförsprödning har genomförts. Utredningen visar att riskerna är försumbara och att påverkan under 100 000 år inte skulle vara mätbar /5-13/.

### **Forskningsprogram**

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **5.2.12 Korrosion kopparkapsel**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Under nu kända förhållanden på djupförvarsnivå beräknas kapseln förbli intakt under mycket lång tid, betydligt längre än de 100 000 år som anges i konstruktionsförutsättningarna. Även om osäkerheterna är stora i bedömningarna över långa tidsperioder är det mycket osannolikt att allmän korrosion eller gropfrätning skulle kunna leda till kapselgenombrott under de 100 000 år kapseln konstruerats för.

Kapselns beständighet mot korrosionsangrepp är en av de viktigaste frågorna i en säkerhetsanalys av KBS-3-metoden. Bland de korrosionsfrågor som behöver belysas mera i kommande säkerhetsanalyser är påverkan av mikrober. Myndigheterna rekommenderar att SKB utan vidare dröjsmål sammanfattar kunskapsläget när det gäller kopparkorrosion.

Kasam menar att med den kunskap som finns idag om korrosion hos ren koppar i den aktuella miljön finns inget som tyder på att ett genombrott genom kapseln skulle förväntas, men att det återstår att verifiera detta även för svetsförbanden.

SKI och SSI anser också att korrosionsanalysen för hela kapslar behöver valideras bättre mot experiment och andra korrosionsmodeller. Dessutom bör SKB i korrosionsanalysen ta hänsyn till svetsarna på kapslarna.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I SKI:s utvärdering av FUD-program 98 konstaterar man att det centrala inom korrosionsområdet är hur kunskapen om korrosionsprocesserna används i de antaganden och analyser som ligger till grund för de korrosionshastigheter som används för dimensionering av koppars tjocklek. Med tanke på det arbete som gjorts de senaste åren och det arbete som pågår inom SKB på korrosionsområdet, anser SKI att SKB borde göra en ny sammanställning av hur olika typer av korrosion utgör en grund för utformningen av kopparkapseln.

SKI anser vidare att SKB bör inhämta resultaten från dessa pågående korrosionsstudier, innan inriktningen ändras till forskning med tonvikt på korrosion i det inledande skedet, innan reducerande förhållanden råder.

SKB anser att sulfatreducerande bakterier och deras överlevnad i förvaret är en av de viktigaste frågorna med avseende på mikrober, men att resultaten från pågående försök kommer att styra vad som kommer att göras fortsättningsvis. SKI vill uppmana SKB att fortsätta studierna av mikrobers inverkan på kapselns integritet.

SKI finner det lovvärt att SKB planerar ett program för korrosionsprovning i realistisk miljö i Äspölaboratoriet, men saknar en mer detaljerad beskrivning av försöken.

## **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Sedan FUD-program 98 har SKB låtit göra en sammanställning av termodynamiska data för koppar /5-14/ samt en sammanställning av kunskapsläget för kopparkorrosion /5-3/. Den senare görs i samarbete med Posiva.

Studierna av förutsättningarna för mikrobiell korrosion har fortsatt sedan FUD-program 98 och resultaten hittills finns redovisade dels i form av en doktorsavhandling, dels som artiklar i vetenskapliga tidskrifter /5-15, 5-16, 5-17/. Hittills har inget framkommit som motsäger SKB:s tidigare slutsatser; sulfatreducerade bakterier är inte aktiva i kompakterad bentonit med den densitet som bentoniten har i deponeringshålen.

Korrosionen av nära 200 miljoner år gammal nativ koppar, som bildats och bevarats i lersten i södra Devon i England, har analyserats och resultatet av undersökningarna rapporterats. Analyserna visar att även om kopparn är påverkad av korrosion har en betydande andel av kopparplåtarna bevarats i den vattenmättade kompakta leran sedan åtminstone slutet på juraperioden, dvs i nästan 200 miljoner år. Bortsett från den vittring som ägt rum när kopparn exponerats under modern tid är förändringarna av kopparn geologiskt gamla och ägde också rum före slutet på juratiden /5-18/. Ytterligare arbete pågår och kommer att avslutas under 2001.

Modelleringen av gropfrätning på koppar under milt oxiderande förhållanden har fortsatt sedan 1998 och en lägesrapport publicerats /5-19/. De viktigaste slutsatserna är att det finns en minimipotential under vilken gropfrätning inte är möjlig. Arbetet beräknas kunna avslutas under 2001 och ingen fortsättning planeras för närvarande.

Koppars känslighet för korngränskorrosion har studerats i en första etapp där inga tendenser till korngränskorrosion kunde noteras /5-20/.

## **Forskningsprogram**

Studierna av mikrobiell korrosion kommer att fortsätta under de närmaste tre åren. De kommer att omfatta dels laboratorieexperiment, dels fältstudier i Äspölaboratoriet. Frågeställningen är densamma som tidigare: Kan naturligt förekommande populationer av sulfatreducerande bakterier i grundvattnet och i bentoniten överleva under förvarsförhållanden och reducera sulfat till sulfid i sådan mängd att den kan hota kapselns integritet? Programmet startar under 2001 och kommer att avslutas under 2004.

Fältexperiment på Äspölaboratoriet med exponering av koppar under flera år för såväl atmosfären i underjordslaboratoriet som olika grundvatten har startats och kommer att löpa under den närmaste treårsperioden. Dessutom kommer kopparkorrosionen i kompakterad bentonit att studeras på plats i Äspölaboratoriet. I dessa experiment kommer eventuella lokala korrosionsangrepp att följas genom att det elektrokemiska bruset från kopparproverna kontinuerligt följs och analyseras. Dessa fältexperiment kommer att kompletteras med laboratoriestudier av anaerob kopparkorrosion i vatten med höga salthalter.

Redoxutvecklingen i bentoniten är av betydelse för formen och utvecklingen av korrosionsangreppen på koppar. Experiment kommer att göras för att bestämma tidsskalan för redoxutvecklingen i bentoniten och för att kartlägga mekanismerna bakom syreförbrukningen i ren bentonit och i koppar/bentonitsystemet.

Studierna av koppars känslighet för korngränskorrosion kommer att fortsätta under de närmaste åren och kommer då även att omfatta svetsgods.

### **5.2.13 Spänningskorrosion kopparkapsel**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 konstaterar SKB att det inte finns några belägg för att spänningskorrosion skulle kunna förekomma i förvarsmiljön. Även om spänningskorrosion inte observerats i den aktuella förvarsmiljön, kan möjligheten inte helt uteslutas med nuvarande kunskaper. Några kriterier för under vilka förhållanden spänningskorrosion uppträder och under vilka förhållanden spänningskorrosion är omöjlig finns inte.

Dragspänningar i kopparkapseln är en nödvändig förutsättning och eftersom kapseln befinner sig under yttre övertryck, är det knappast troligt att spänningskorrosion skulle leda till genombrott på kapseln. Detta skulle rimligen kräva genomgående dragspänningar i hela kapselväggen och en sådan situation bedöms inte kunna uppstå under normala förvarförhållanden.

Enkla hållfasthetsberäkningar som SKI har utfört visar att under normala förhållanden kommer delar av kopparkapseln att ligga under dragspänningar även om tryckspänningar råder på större delen av kapselytan. Myndigheterna anser därför att SKB tydligare behöver visa att förhållandena är sådana att spänningskorrosion inte kan förekomma på kopparhöljet alternativt att SKB tar hänsyn till tänkbara effekter av spänningskorrosion i sin analys av kapselns livslängd.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Överslagsberäkningar som SKI har genomfört för t ex kapselns lock visar att detta kommer att deformeras plastiskt vid den belastning som förväntas råda i slutförvaret. Som ett resultat av deformationen kommer vissa delar av kapseln och locket att utsättas för dragspänningar. SKI anser därför att det finns en risk för spänningskorrosion vid dessa ytor, och att SKB behöver visa att risken för spänningskorrosion är försumbar i den miljö som kapseln kommer att befinna sig i.

#### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

En undersökning av riskerna för spänningskorrosion under reducerande förhållanden i närvaro av ammoniumjoner har genomförts i samarbete med Posiva. Resultaten tyder inte på att det skulle finnas några risker för spänningskorrosion under dessa förhållanden /5-21/.

En undersökning av spricktillväxten vid spänningskorrosion har rapporterats. Resultaten hittills tyder på att det finns ett tröskelvärde för spänningsintensiteten för att spänningskorrosionssprickor ska växa, men att ytterligare data behövs för att öka trovärdigheten för detta /5-22/.

#### ***Forskningsprogram***

Forskningen kring spänningskorrosion av koppar i förvarsmiljö kommer att fortsätta både med laboratorieexperiment och fältförsök i Äspölaboratoriet. För närvarande pågår en pilotstudie av förutsättningarna för att studera spänningskorrosion med mätningar av elektrokemiskt brus i samarbete med Kanada. Om resultaten är positiva kommer metoden att installeras och användas i Äspölaboratoriet för att in situ studera förutsättningarna för spänningskorrosion av koppar i en realistisk förvarsmiljö. Dessa undersökningar kommer att kompletteras med beräkningar av spänningstillstånden i kapseln vid olika tillfällen efter deponering (se avsnitt 5.2.5).

Undersökningarna av spricktillväxt på grund av spänningskorrosion kommer också att fortsätta under perioden för att förbättra det experimentella underlaget för bedömning av riskerna för spänningskorrosion i förvarsmiljö.

#### **5.2.14 Korntillväxt koppar**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 citerades Pettersson /5-23/, som drog slutsatsen att korntillväxt i kopparkapseln kommer att vara försumbar.

Processen kommenterades inte i granskningen av SR 97.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI noterar att avspänningsglödning är specificerat för de valsade rören. I beaktande av de låga och variabla spänningarna som förekommer, bör SKB ställa sig frågan om detta kan leda till kritisk korntillväxt.

##### ***Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

##### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

#### **5.2.15 Radionuklidtransport**

Behandlas i avsnitt 7.3 som gäller radionuklidtransport i bränsle/kapselns hålrum.

#### **5.2.16 Integrerade studier – skadad kapsels utveckling**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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 intransport av vatten eller vattenånga genom diffusion att vara större än inläckaget av vatten. Tiden fram till dess varierar med antagandena om hålets storlek och korrosionshastigheten, men är i de flesta fall tusentals år. Indiffusionen av vattenånga innebär att korrosionen inte kommer att helt avstanna. Detta kommer att leda till en långsam ansamling av korrosionsprodukter och en tryckupbyggnad innanför kopparkapseln, som så småningom kommer att leda till att kopparkapseln lokalt deformeras och till slut brister.

Flera av de ovanstående processerna i kapseln och dess hålrum påverkar alltså skeendet och behöver modelleras integrerat för att ge en bild av hur en skadad kapsel utvecklas. I SR 97 genomfördes två studier /5-24, 5-25/. Slutsatserna från dessa är i sammanfattning: ett litet hål på kapseln kommer att förbli litet under mycket lång tid, 100 000 år eller mer. Så småningom kommer dock skadan att vidgas och kopparkapseln brista.

Myndigheterna anser att vissa antaganden rörande mekaniska effekter på kapseln kan ifrågasättas, bl a att kopparhöljet brister när deformationen överstiger koppars brotttöjning, dvs 29 procent /5-24/. Eftersom processen är mycket långsam borde i stället krypning vara den dimensionerande processen. Detta skulle innebära att kapseln endast tål krypbrottöjningen som förväntas vara betydligt lägre än 29 procent. Myndigheterna anser att SKB ännu inte visat att den föreslagna modellen verkligen förutsäger en trolig utveckling av en defekt kapsel och inte bara utgör ett idealiserat beräkningsfall. SKI bedömer att svårigheten ligger i att SKB:s modell utgår ifrån kopplade effekter av ett flertal processer av vitt skilda karaktärer (korrosion, gastransport, grundvattenflöde, mekanisk påverkan). Ett sådant starkt kopplat system kan vara känsligt för små variationer i initialvillkor, randvillkor, hastighetskonstanter samt inverkan av sekundära processer som försumrats i SKB:s analys.

### ***Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98***

Sedan 1998 pågår experimentella undersökningar av de mekaniska egenskaperna hos oxider som bildas på järn och stål under anaeroba förhållanden. En första etapp är nu genomförd och resultaten publicerade /5-26/. Rapporten beskriver en ”mekanisk spänningscell” som konstruerats för att mäta den expansion som skulle kunna orsakas av anaerob korrosion av stål under yttre tryck. Apparaten består av en trave (200 stycken) koppar/stål-plattor som är nedsänkta i simulerat syrefritt vatten. Ett system med hävstänger förstärker och registrerar ändringar i koppar/stålstapelns längd. Ingen expansion kunde observeras efter mer än ett års exponering. Den minsta detekterbara förändringen motsvarade ett skikt av korrosionsprodukter på 1 nm per stålplatta. I ett separat experiment uppskattades elasticitetsmodulen för korrosionsprodukter på järn och stål till att ligga i intervallet  $4 \cdot 10^4$  till  $2 \cdot 10^6$  Pa /5-26/.

### ***Forskningsprogram***

De experimentella undersökningarna som beskrivits ovan kommer att fortsätta under de närmaste åren. I en första etapp kommer korrosionsprodukterna att karakteriseras. Nya experiment kommer därefter att startas med exponeringar i en aggressivare miljö, där korrosionshastigheten för järn förväntas vara ett par storleksordningar större än i den nu studerade. När nödvändiga data tagits fram kommer nya modelleringar av det slag som rapporteras i /5-24/ och /5-25/ att genomföras.

## 6 Buffert

Bufferten ska skydda kapseln mekaniskt vid decimeterstora bergrörelser och hindra grundvatten och korroderande ämnen att komma in till kapseln. Den ska också bidra till fördröjningen av utsläppet av radionuklider om kapseln skulle skadas. I FUD-program 98 preciserades en rad krav på buffertmaterialet:

- Den hydrauliska konduktiviteten bör vara så låg att en eventuell transport av korroderanter och radionuklider enbart sker genom diffusion.
- 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 bergrörelser kan tas upp utan att kapslarna skadas.
- Kolloidala partiklar ska filtreras av bufferten.
- 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.

SKB har valt en naturlig Na-bentonit av Wyoming-typ som referensmaterial för bufferten. MX-80 är en naturlig lera från Wyoming eller South Dakota i USA. Beteckningen MX-80 är ett handelsnamn som specificerar en viss kvalitet och kornstorlek av torkad och mald bentonit. 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/m<sup>3</sup>.

SKB har dock inte slutgiltigt valt buffertmaterial och dimensioner. Det kan finnas andra material som är lika lämpliga som MX-80, se vidare avsnitt 6.1.2.

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 MX-80 buffert med en densitet av 2 000 kg/m<sup>3</sup> i vattenmättat tillstånd är transportkapaciteten för diffusion minst 10 000 gånger högre än den för advektion.

MX-80 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).

### **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.

### **Svällegenskaper**

Bufferten måste kunna svälla för att fylla utrymmet mellan kapsel och berg och för att täta öppningar som kan orsakas av termiska och tektoniska effekter. Erforderlig expansionsförmåga hos bufferten uppskattas motsvara ett minsta svälltryck av cirka 1 MPa, vilket förutsätter en densitet av minst 1 900 kg/m<sup>3</sup> för MX-80 i vattenmättat tillstånd.

### **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/m<sup>3</sup> och tillämpning av en halvempirisk reologisk modell har visat att förutsedda bergrörelser inte åstadkommer buffertdeformationer som ger upphov till kapselskador.

### **Mikrobiella egenskaper**

Bakterietillväxt har visat sig kunna ske i MX-80 buffert med en densitet av upp till 1 700 kg/m<sup>3</sup> vid vattenmättnad, medan 1 900 kg/m<sup>3</sup> 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.

### **Termiska egenskaper**

Buffertens förmåga att överföra värme från kapslar till berg har betydelse främst genom att alltför lågt värmeledningstal ger upphov till hög bufferttemperatur. Det medför ökad löslighet hos smektiten 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 kapitel 14.5.2. I det följande tas tillverkningsfrågor upp i den mån de har betydelse för redovisningen av forskningsprogrammet.



## 6.1 Buffertens initialtillstånd

### 6.1.1 Variabler

I SR 97 beskrevs bufferten med en uppsättning variabler, se tabell 6-1.

Initialtillståndet, dvs värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering, beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 6.4. I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i bufferten.

**Tabell 6-1. Variabler för bufferten och återfyllningen.**

Variabel	Definition
<b>Geometri</b>	Geometrisk mått för buffert/återfyllning. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären.
<b>Porgeometri</b>	Porgeometri som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. Ofta anges porositet, dvs den andel av volymen som inte upptas av fast material.
<b>Strålintensitet</b>	Intensitet av ( $\alpha$ -, $\beta$ -,) $\gamma$ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Temperatur</b>	Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Smektitihalt</b>	Smektitihalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Vattenhalt</b>	Vattenhalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Gashalter</b>	Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Hydrovariabler</b>	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Svälltryck</b>	Svälltryck som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Smektit-sammansättning</b>	Smektitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till smektitytan ingår i denna variabel.
<b>Porvatten-sammansättning</b>	Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning.
<b>Föroreningshalter</b>	Halter av föroreningar i tid och rum i buffert och återfyllning. Till föroreningar räknas alla mineral utom smektit. I återfyllningen räknas bergskrosset till föroreningarna.

## **6.1.2 Geometri**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Buffertens geometri bestäms av dimensionerna på kapseln och den tjocklek av buffertmaterial som krävs för att få önskad funktion. I SR 97 var kapselns mått givna och dimensionerna valdes till 35 cm på kapselns sidor, 50 cm under kapseln och 150 cm ovanför kapseln. Varken i SR 97 eller i dess granskning framkom något som ifrågasätter dessa dimensioner.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 påpekas att även leror med lägre smektithalt än MX-80 skulle kunna klara de konduktivitetskrav som ställs på bufferten. Ett val av en annan lera skulle eventuellt leda till att buffertens dimensioner skulle ökas. I FUD-program 98 planerades studier av alternativa buffertmaterial.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

En del av studien av alternativa buffertmaterial rapporteras i /6-1/. Där dras slutsatsen att flera mineraltyper är användbara men montmorillonit lera bedöms som oöverträffad. Kandidater vid sidan av Wyomingbentonit (t ex MX-80) är konverterade Ca-bentoniter och saponit. Fortsättningen av studien beskrivs nedan.

### ***Forskningsprogram***

SKB:s referensmaterial MX-80 har studerats ur olika aspekter under lång tid av ett flertal organisationer. Materialets specifika fysikaliska och kemiska egenskaper med avseende på buffertfunktion kan anses vara väl kända.

Det är inte realistiskt att studera alternativa material i samma omfattning som MX-80. Insatserna under den kommande perioden inriktas därför på att korrelera önskvärda fysikaliska och kemiska egenskaper till grundläggande mineralogiska egenskaper, t ex samband mellan svälltryck och lermineralets katjonbyteskapacitet, jonslag (natrium eller kalcium) och laddningsfördelning. Syftet med insatserna är att beskriva avgörande samband så väl att en relativt begränsad mineralogisk karakterisering kan ge en tillräcklig uppfattning om ett materials lämplighet som buffertmaterial och vilka eventuella modifieringar av buffertdimensioner som behöver göras för att materialet ska kunna användas. Arbetet kan i förlängningen väntas mynna ut i en grundläggande kravspecifikation, som kan användas som ett första urvalskriterium vid val och inköp av buffertmaterial. En sådan specifikation måste då innefatta krav som garanterar såväl grundläggande fysikaliska och kemiska egenskaper som långtidsstabilitet hos dessa egenskaper.

## **6.1.3 Porgeometri**

### ***Slutsatser i SR 97 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.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 påpekas att även leror med lägre smektithalt 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/porositet.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Fysikaliska och kemiska egenskaper hos alternativa buffertmaterial kommer att korreleras till grundläggande mineralogiska data, se avsnitt 6.1.2.

#### **6.1.4 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 6.2.2.

#### **6.1.5 Temperatur**

Buffert och återfyllning har vid deponeringen omgivningstemperatur. 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 av omkring 5 °C. Detta bedömdes i SR 97 sakna betydelse för den termiska utvecklingen i förvaret.

Bestämningen av den initiala bufferttemperaturen är trivial, i motsats till värmetransporten i bufferten efter deponering, se avsnitt 6.2.12.

#### **6.1.6 Smektithalt**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

MX-80 är en kommersiell produkt med en given sammansättning. I SR 97 förutsätts att kravet på smektitinnehåll är 75 procent. Den levererade produkten kommer att kvalitets-testas innan den tas till förvaret.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 påpekas att även leror med lägre smektithalt än MX-80 skulle kunna klara de konduktivitetskrav som ställs på bufferten. SKI efterlyste studier av andra material än MX-80.

##### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

En del av de efterfrågade studierna har avrapporterats i /6-1/, se vidare avsnitt 6.1.2.

## **Forskningsprogram**

De karakteriseringar av MX-80 som publicerats är relativt gamla. Under den kommande FUD-perioden kommer därför en ny fysikalisk och kemisk karakterisering att genomföras.

Beträffande alternativa material, se avsnitt 6.1.2.

### **6.1.7 Vattenhalt**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

De kompakterade bentonitblocken har en initial vattenmättnadsgrad av 85 procent och pelletsen i spalterna mellan bufferten och berget 50 procent. Spalterna mellan bufferten och kapseln samt mellan bufferten och berget kan fyllas med vatten.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

#### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Teknik har utvecklats för enaxlig pressning av block i full skala och produktion av block i Äspölaboratoriet har genomförts med framgång. Block med höjden 50 cm och diametern 165 cm för placering under och över kapseln och ringar med samma höjd och ytterdiameter och med en innerdiameter av 107 cm har tryckts till både naturlig vattenkvot 10 procent och förhöjd vattenkvot 17 procent. Presstrycket kan anpassas så att en medeldensitet i deponeringshållet av 2 000 kg/m<sup>3</sup> efter full vattenmättnad erhålls om pellets placeras i spalten mellan berg och block. SKB har dock inte för avsikt att i all framtid låsa sig för att fylla spalten med pellets och vatten. Kravet är att bufferten ska uppnå en specificerad täthet. Ungefär 100 block och ringar med vattenkvoten 17 procent har tillverkats för fullskaleförsöken i Äspö.

## **Forskningsprogram**

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. Idag 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.

### **6.1.8 Gashalter**

Bentonitblocken har vattenmättnadsgraden 85 procent, vilket betyder att 85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft. Den yttre spalten fylls med bentonitpellets och vatten. 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.

### **6.1.9 Hydrovariabler**

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gstryck. Initialt är det relevant att beskriva gas- och vattentryck. Flöden förekommer inte initialt i bufferten. Vid inplacering av kapsel och buffert kommer deponeringshålerna att hållas dränerade och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gstryck (luft) av 1 atm (cirka 0,1 MPa) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa.

### **6.1.10 Svälltryck**

Svälltrycket utbildas när buffert/återfyllning närmar sig full vattenmättnad, se avsnitt 6.2.7. Initialt finns inget svälltryck.

### **6.1.11 Smektitsammansättning**

Referensmaterialet för bufferten är MX-80 bentonit som består av cirka 75 procent Na-montmorillonit. I övrigt är det som sägs om smektithalten i avsnitt 6.1.6 tillämpligt också för smektitsammansättningen.

### **6.1.12 Porvattensammansättning**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Bentonitlera i naturen innehåller vatten. Sammansättningen av lerans porvatten beror på platsens geokemiska historia och de mineral som leran innehåller. 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 85 procent i de färdiga blocken.

Porvattnets sammansättning har aldrig analyserats vare sig i den naturliga leran eller i de färdiga blocken, men variationerna förväntas vara små eftersom materialet är relativt homogent.

Ovanstående gäller den initiala vattensammansättningen. Den kemiska utvecklingen på sikt hanteras i avsnitt 6.2.23.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

För den långsiktiga utvecklingen, se avsnitt 6.2.23.

### **6.1.13 Föroreningshalter**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Bentonit är ett naturligt förekommande material med naturliga variationer i sammansättningen. MX-80 är en kommersiell produkt som blandas för att klara givna specifikationer. Osäkerheterna i föroreningshalter förväntas därför vara små och utan betydelse för buffertens funktion.

En relaterad fråga gäller mängder och typer av kvarlämnade material i deponeringshål och tunnlar. Detta beskrivs i avsnitt 14.5.7.

Myndigheterna anser att möjliga negativa effekter som kan uppstå beroende på närvaro av kvarglömda material behöver belysas. Detta behandlas i avsnitt 7.2.16.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

#### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Två ettårsförsök som gjorts inom ramen för LOT-projektet i Äspölaboratoriet har avrapporterats, se avsnitt 6.2.23.

#### ***Forskningsprogram***

Beträffande karakterisering av MX-80 bentonit, se avsnitt 6.1.2 och 6.2.23.

## **6.2 Processer i bufferten**

### **6.2.1 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 mättnadsförloppet 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 bl a 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 vattenmättnadsförloppet, därefter dominerar diffusion. Genom osmos kan framför allt salthalten i porvattnet påverka buffertens fysikaliska egenskaper. Genom jonbyte och sorption kan buffertens ursprungliga innehåll av joner på lerpartiklarnas ytor ersättas av andra jonslag. Kemisk smektitnedbrytning kan förekomma bl a i form av illitisering. Föroreningar 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 6.2.12 och 6.2.23, som behandlar buffertens utveckling vid omättade respektive mättade förhållanden.

## **6.2.2 Stråldämpning/värmealstring**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Gamma- och neutronstrålning från kapseln dämpas i bufferten. Dämpningens storlek beror främst av buffertens densitet och vattenhalt. Resultatet blir ett strålfält i bufferten som bl a 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 bedömdes i SR 97 vara tillräcklig för säkerhetsanalysens behov.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

### **6.2.3 Värmetransport**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I en vattenmättad buffert transporteras värme genom ledning med väl kända värmeledningsegenskaper. 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 bl a eftersom värmeledningseffektiviteten beror av vattenhalten.

Även värmeövergången mellan kapseln och bufferten blir mer komplicerad eftersom det finns en vatten- och 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 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.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI ansåg att kunskapen om omättad buffert inte håller samma klass som för mättad. SKI ville också att THM-modelleringen skulle kompletteras med enklare beräkningar för att uppskatta rimligheten i resultaten.

#### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

För omättade förhållanden, se 6.2.12.

För mättade förhållanden, se 6.2.23.

#### ***Forskningsprogram***

För omättade förhållanden, se 6.2.12.

För mättade förhållanden, se 6.2.23.

### **6.2.4 Vattentransport vid omättade förhållanden**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

SKB bedömer att kvaliteten hos indata och modeller som används i beräkningarna av vattentransport vid omättade förhållanden är tillräcklig för att genomföra en fullgod analys av den hydrauliska utvecklingen i basscenariot. Precisionen i beräkningarna skulle öka med bättre kunskap om de hydrauliska egenskaperna kring enskilda deponeringshål, något som kan förväntas först vid själva förvarsutbyggnaden.



Från granskningen av SR 97 noteras följande:

”Myndigheterna anser att Processrapporten innehåller en bra genomgång av de processer som påverkar återmättnad och vattentransport. Myndigheterna ifrågasätter dock SKB:s uttalande om att förståelsen för vattenmättnadsförloppet för bentonitbufferten idag är tillräcklig för säkerhetsanalysens behov. SKB konstaterar själva att det teoretiska kunskapsunderlaget för vattenmättnadsförloppet inte är heltäckande. Det finns idag heller inget entydigt experimentellt belägg som stödjer SKB:s antaganden om bentonitbuffertens mättnadsförlopp.”

”Myndigheterna kan konstatera att den helt styrande faktorn för att uppnå en snabb och homogen mättnad av bentoniten i deponeringshålen är en jämnt fördelad tillgång på vatten i deponeringshålen vägg. Om inte detta kan uppnås, vilket inte visats i SR 97, kommer sannolikt svällningen av bentoniten genom ojämnt vattenupptag bli att medföra en ojämn belastning på kapseln i deponeringshålen. Detta kan i sin tur påverka kopparkapselns mekaniska integritet.”

”Att det fortfarande finns ett stort behov av kunskapsuppbyggnad kring återmättnad av bentonitlera, även för andra länders slutförvaringskoncept, understryks av den omfattande forskning som drivs inom ramen för flera stora internationella projekt. SKB bedriver själva ett omfattande FoU-program i Äspö berglaboratorium, som förväntas ge nya insikter under de närmaste tiotals åren.”

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Bentonitens sugpotential eller porvattenundertryck är den främsta drivkraften för vattenmättnaden. Den beror av främst vattenkvoten i bentoniten. Laboratorieförsök visar att porvattenundertrycket även är beroende av det yttre trycket och avtar med ökande svälltryck eller pålagt yttre tryck. Detta betyder att porvattenundertrycket minskar med ökande vattenmättnad i ett volymbegränsat system på ett sätt som avviker från det hittills antagna. Det kan påverka slutfasen av vattenmättnadsprocessen. Fenomenet studeras i ett pågående doktorandprojekt, se vidare forskningsprogrammet för laboratorieförsök i avsnitt 6.2.12.

Påverkan på kapseln av ojämn bevätning har efter SR 97 studerats med överslagsberäkningar och finita elementberäkningar av ytterlighetsfall /6-2/. Slutsatsen av beräkningarna är att kapselns mekaniska integritet inte påverkas av ojämn bevätning. Eftersom bentonitblocken trycks vid en förhöjd vattenkvot av 17 procent och eftersom den yttre spalten med pellets fylls med vatten motsvarar den initiala vattenmängden en vattenmättnadsgrad i bufferten på i medeltal mer än 85 procent. Detta medför, tillsammans med bentonitens relativt ringa styvhet, att de effekter som analyserats vid beräkning av ytterlighetsfallen enligt finita elementmetoden blir betydligt lindrigare än de effekter som beräknats med hjälp av överslagsberäkningar.

## **Forskningsprogram**

För att öka kunskaperna om processerna och förbättra modellerna som beskriver återmättnaden bedrivs flera forskningsprogram.

- Modellstudier THM, omättade förhållanden.
- Fullskaleförsök i Äspölaboratoriet.
- Stödjande laboratorieförsök för modellering av fullskaleförsöken.
- Laboratorieförsök på omättad bentonit för bättre förståelse av hydro-mekaniska processer.
- Fullskaleförsöket FEBEX II i Grimsellaboratoriet i Schweiz.

Programmen beskrivs i avsnitt 6.2.12.

## **6.2.5 Vattentransport vid mättade förhållanden**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

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 som nämns i SR 97 rör effekten av omvandlingar, som förväntas ge högre hydraulisk konduktivitet. Även effekterna av mycket höga salthalter är otillräckligt utredda, se avsnitt 6.2.15.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Processen behandlades inte explicit. SKI efterlyste dock fler experiment som rör den mättade buffertens THM-egenskaper, se avsnitt 6.2.23.

### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

En studie av risken för att buffert och backfill ska råka i flyttillstånd (liquefaction) till följd av skalv har avslutats /6-3/. Slutsatserna av studien baseras på empiriska samband mellan avstånd till skalv och dokumenterade fall av liquefaction, på experimentella data från JNC, Japan och på en överslagsmässig analys av barriärmaterialens känslighet för liquefaction. Slutsatsen är att för de densiteter som kommer att gälla för buffert och återfyllning i KBS-3-konceptet finns ingen risk för liquefaction.

Se även avsnitt 6.2.23 för integrerade fältstudier.

## **Forskningsprogram**

Vad gäller THM-modellen för mättade förhållanden, se avsnitt 6.2.23.

Vad gäller flyttillstånd kommer dokumenterade effekter av framför allt portrycks-transienter på systemet vatten/berg, att inventeras. Denna del av programmet blir alltså en fortsättning, eller utvidgning, av den studie /6-3/ som tidigare gjorts beträffande risken för liquefaction av buffert och backfill.

För integrerade fältstudier, se avsnitt 6.2.23.

## **6.2.6 Gastransport/gaslösning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Transport av gas i bufferten kan bli problematisk framför allt om stora mängder vätgas skulle produceras genom järnkorrosion inuti en skadad kapsel.

En kvarstående osäkerhet i förståelsen av gastransport i buffertmaterialet gäller antalet, storleken och det rumsliga arrangemanget av de gasförande sprickorna samt volymbeteendet hos leran under gasinjektion. De experiment som gjorts hittills indikerar att leran måste utvidgas (växa i volym) under gastransporten och att förändringar i gasinnehåll måste balanseras med en ökad totalvolym.

Dessutom kvarstår osäkerheter kring vid vilket tryck gasen slutar flöda och hur detta beror av svälltrycket.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Kvarstående oklarheter gällde hur randvillkoren påverkar gastransporten och hur resultaten från gastransportförsök ska användas för de förhållanden som gäller i ett förvar.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Den experimentserie som pågår med gasinjektioner genom MX-80 har visat att den tidigare slutsatsen att bufferten öppnar sig när gastrycket överstiger summan av det hydrostatiska trycket och svälltrycket inte stämmer för alla typer av randvillkor. Det har också visats att gasgenombrottet kan vara hastighetsberoende, dvs bero på hur snabbt trycket byggs upp.

### ***Forskningsprogram***

Slutsatserna från FUD-program 98 kvarstår. Förståelsen för gastransport i bentonit är otillräcklig och området prioriteras därför. Både modellutvecklingen och det experimentella programmet kommer att fortsätta. Pågående experiment syftar till att ge svar på frågorna om öppnings- och stängningstryck samt vilka typer av transportvägar som gasen bildar. Däremot kommer inga experiment i förvarsskala att hinna genomföras under den närmaste treårsperioden, vilket gör att skalberoendet kommer att vara en kvarstående osäkerhet. Modellutvecklingsprojektet GAMBIT kommer att fortsätta och den tredje fasen startade under 2001. Avsikten med denna fas är att ta fram en modell som kan beskriva gas i makroskopisk skala, dvs beräkna gastransport i ett förvar.

## **6.2.7 Svällning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I bufferten och återfyllningen kommer vattenupptaget efter deponeringen att leda till svällning. I bufferten leder dessutom uppvärmningen till termisk expansion av porvattnet. 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 också till att lera tränger in i bergets sprickor. På lång sikt kan också kemiska förändringar i bufferten leda till att svällegenskaperna förändras, se avsnitt 6.2.16–6.2.17 samt 6.2.23.

Svällningen är starkt kopplad till vattentransporten vid omättade förhållanden. Den beskrivs med den integrerade THM-modellen se avsnitt 6.2.12.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Se avsnitt 6.2.12.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Den modell som föreslagits för volymskrympning har verifierats, se avsnitt 6.2.8.

Modellerna för kopplade THM-processer vid omättade förhållanden har testats, se avsnitt 6.2.12.

Salthaltens betydelse för svälltrycket har studerats för MX-80, se avsnitt 6.2.15.

### ***Forskningsprogram***

THM-processerna vid omättade förhållanden kommer att studeras både i fält och på laboratorium, se avsnitt 6.2.12.

Ett program för inventering, utvärdering och användning av alternativa beräkningsmodeller kommer att genomföras, se avsnitt 6.2.12.

Svälltryck i kompakterad bentonit vid hög salthalt undersöks i ett pågående samarbete med Posiva, se avsnitt 6.2.15.

Forskningsprogrammet för modellen för THM-utveckling i mättad buffert redovisas i avsnitt 6.2.23.

## **6.2.8 Mekanisk växelverkan buffert/återfyllning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I kontaktytan mellan bufferten och återfyllningen utövar bufferten ett svälltryck mot återfyllningen och vice versa. Eftersom skillnaden i svälltryck är stor uppstår ett netto-tryck mot återfyllningen varvid bufferten sväller och återfyllningen komprimeras. Uppsvällningens storlek beror på buffertens och återfyllningens ursprungliga densiteter och avhängiga expansions- och kompressionsegenskaper. Mekanismerna för denna samverkan är väl kända och delvis bekräftade i Stripa BMT /6-4/. Mekanisk växelverkan mellan buffert och återfyllning är kopplad till vattentransporten vid omättade förhållanden, avsnitt 6.2.12. Osäkerheten i processen gäller främst den uppnådda densiteten på återfyllningen.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI efterlyser ökad kunskap om bufferten vid omättade förhållanden, samt att THM-modelleringen kompletteras med enklare rimlighetsberäkningar, se avsnitt 6.2.12.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

I den pågående forskningen görs kompressions- och svällningsförsök med vattenmättad bentonit under lång tid dels för att förbättra modellen av den vattenmättade bentonitens mekaniska funktion, dels för att verifiera och förbättra krypmodellerna. Den modell som föreslagits för volymkrypning har verifierats /6-5/ och nya försök syftar till att ge bättre underlag för val av parametrar.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 6.2.23, forskningsprogrammet för modellen för THM-utveckling i mättad buffert.

## **6.2.9 Mekanisk växelverkan buffert/kapsel**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel uppkommer från bufferten genom ler-matrisen som genererar både tryckpåkänningar och skjuvspänningar, genom porvattnet som bara genererar tryckpåkänningar och genom 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. 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.

Mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel är kopplad till vattentransporten vid omättade förhållanden, avsnitt 6.2.12.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI efterlyser ökad kunskap om bufferten vid omättade förhållanden, samt att THM-modelleringen kompletteras med enklare rimlighetsberäkningar, se avsnitt 6.2.12.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Sättningen hos kapseln genom krypdeformationer hos bufferten har beräknats i /6-6/. Den totala sättningen är någon centimeter på 100 000 till en miljon år, se även avsnitt 6.2.8.

### ***Forskningsprogram***

Behandlas i avsnitt 6.2.12 (kapselrörelser under mättnadsförloppet) och 6.2.23 (modellstudier av långsiktig kompression av bufferten). Under den kommande treårsperioden kommer också en mindre experimentserie att genomföras för att testa bentonitens egenskaper vid snabba tryckökningar eller -sänkningar orsakade av t ex ett jordskalv.

## **6.2.10 Mekanisk växelverkan buffert/närfältberg**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Den mekaniska växelverkan mellan buffert och närfältberg orsakas bl a av svälltryck från bufferten, konvergens av deponeringshål och skjuvrörelser i berget. Konvergens behandlas i avsnitt 8.2.9.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Behandlas i avsnitten 6.2.12 (tryckpåkänningar på berget) och 6.2.23 (mekanisk modellering av effekter av berg rörelser).

## **6.2.11 Termisk expansion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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 6.2.12.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Termisk expansion ingår i den kopplade THM-modellen, se avsnitt 6.2.12.

## **6.2.12 Integrerade studier – THM-utveckling i omättad buffert**

### ***Slutsatser i SR 97 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.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI ansåg att kunskapen om omättad buffert inte håller samma klass som för mättad. SKI ville också att THM-modelleringen skulle kompletteras med enklare beräkningar för att uppskatta rimligheten i resultaten.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

#### **Modellstudier**

Modellerna för beräkning av kopplade THM-processer i vattenomättad buffert har förfinats och testats i några internationella projekt (DECOVALEX II /6-7/ och Catsius Clay /6-8/), där beräknad temperatur, spänning, deformation och vattentransport har kunnat jämföras med uppmätta resultat både vid laboratorie- och fältförsök. I dessa projekt har förståelsen för processerna och modellernas tillförlitlighet kunnat ökas. En slutsats är att termiska och i viss mån hydrauliska processer kan modelleras med god tillförlitlighet men att förbättrade modeller för mekaniska och hydrauliska processer i vissa fall är önskvärd.

### ***Forskningsprogram***

#### **Modellstudier**

De beräkningsmodeller som hittills använts för analys av kopplade THM-processer i vattenomättad bentonit har visat sig otillräckliga på några punkter. 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, t ex om man inte beaktar möjligheten av att vattenånga lämnar bufferten för att kondenseras i återfyllningen, kan man med de beräkningsmodeller som används nu relativt väl simulera effekterna av temperaturdriven ångtransport utan att explicit modellera ångfasen. Effekter av andra gaser däremot kan överhuvudtaget inte beaktas.

Ett program för inventering, utvärdering och användning av alternativa beräkningsmodeller har därför startats och kommer att fortsätta under de närmaste åren. De koder som i första hand kommer i fråga är COMPASS /6-9/, som utvecklats vid University of Wales i Cardiff, och CODE\_BRIGTH /6-10/ som utvecklats vid UPC, Universidad Politécnic de Cataluña, 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.

Det överordnade målet är att kunna beskriva buffertens väg till vattenmättnad på ett fysikaliskt korrekt sätt beträffande värmetransport, inverkan av förluster av vattenånga, uppbyggnad av svälltryck, tid för vattenmättnad och hydromekanisk utveckling i spalten mellan kapsel och buffert, dels att kunna bestämma vikten av de olika faktorer som avgör tidsskalan för vattenmättnadsprocessen.

Fristående från THM-modellen kommer betydelsen av mikrostrukturen att utvärderas. Syftet är att göra en syntes av publicerade mikrostrukturella modeller och relatera dem konceptuellt och kvantitativt till alla viktiga praktiska egenskaper hos bufferten.

## **Fältstudier**

Experimentella studier av THM-processer vid omättade förhållanden kommer att göras både i fält och laboratorium. I Äspölaboratoriet har två fullskaliga försök startats (Återtagsförsöket och Prototypförvaret).

Återtagsförsöket beskrivs i avsnitt 14.5.6. Dess egentliga syfte är att pröva en teknik för att återta kapslar efter det att bentoniten har blivit vattenmättad, men försöket kan användas till att studera THM-processer innan kapseln återtas. I ett simulerat deponeringshål har kapsel och buffert, med sammansättning som är identisk med Prototypförvarets, installerats och hålet pluggats med betong som förankrats med nio stag. Bentoniten och kapselytan är försedda med givare för att mäta temperatur, totaltryck, vattentryck och relativ fuktighet i punkter som är identiska med avsedda mätpunkter i Prototypförvaret. Det som skiljer försöket från Prototypförvaret är att deponeringshålets väggar försetts med filter för konstgjord bevätning och att återfyllningen ersatts med en plugg. Buffertens hydrauliska och mekaniska randvillkor bestäms genom mätningar.

Eftersom den komplexa hydrauliska samverkan mellan berg och buffert eliminerats i återtagsförsöket med filter och likaså den mekaniskt komplexa samverkan mellan buffert och återfyllning eliminerats med pluggen, lämpar sig försöket väl till utvärdering och kalibrering av THM-modellerna för bufferten. Eftersom återtagstekniken förstör bufferten, övervägs provtagning i bufferten under något skede.

Prototypförvaret beskrivs i avsnitt 12.3.2. Det ska bestå av en inre sektion med fyra hål som ska brytas efter cirka 20 år och en yttre sektion med två hål som ska brytas efter cirka fem år. Tunneln återfylls med en blandning av bentonit och krossat berg och sektionerna begränsas med två pluggar. THM-processerna studeras på liknande sätt som för Återtagsförsöket. Eftersom de två sektionerna bryts vid olika tidpunkter kan användbara resultat för utvärdering av mättnads- och homogeniseringsprocesserna i bufferten erhållas. I försöket ingår sex deponeringshål. Därmed blir resultaten användbara för utvärdering av bergets påverkan på bevättningsprocessen och den hydrauliska samverkan mellan berg och buffert.

## **Laboratieförsök**

I samband med modellering av de båda fältförsöken kommer ett flertal laboratieförsök att behöva göras, dels för att bestämma de parametrar som ingår i materialmodellerna, dels för studier av vissa fenomen i den komplexa bufferten.

För att få en bättre allmän förståelse för hydro-mekaniska processer i omättad bentonit genomförs laboratieförsök, delvis som ett doktorandarbete. Följande hydrauliska processer har koppling både till mekanisk och termisk utveckling och kommer att studeras i laboratoriet:



- Inverkan av tryck (svälltryck såväl som totaltryck) på porvattenundertrycket. Dessa studier görs bl a med laboratorieförsök i vilka ett prov av omättad bentonit stängs in i en ödometer 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 förväntas erforderliga samband kunna erhållas.
- Hydrauliska konduktiviteten i omättad bentonit. Bevättningshastigheten är starkt beroende av den hydrauliska konduktiviteten, som i sin tur beror av såväl porositet som vattenmättnadsgrad. I omättad bentonit kan hydrauliska konduktiviteten endast bestämmas med indirekta metoder, där känt porvattenundertryck är en betydelsefull parameter.
- Vattenomfördelningen genom ångtransport i en temperaturgradient. Denna omfördelning påverkar bevättningshastigheten, homogeniseringen och svälltrycksutvecklingen och kommer att studeras.

### 6.2.13 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 6.2.23. Vattenflöde i bufferten under omättade förhållanden behandlas i detalj i avsnitt 6.2.4.

### 6.2.14 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 6.2.23 vad gäller buffertens kemiska utveckling samt i avsnitt 6.2.25 vad gäller radionuklidtransport.

### 6.2.15 Osmos

Buffertens fysikaliska egenskaper, bl a 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 bundet vatten. Sambandet kan mätas och brukar beskrivas med en s k vattenhållnadskurva. Även andra komponenter, t ex omgivande berg, salt i grundvattnet och bakterier, i ett förvarssystem kan binda vatten i olika grad varvid konkurrens om vattnet uppstår. Bentonitens svälltryck påverkas därigenom vilket kan beskrivas kvantitativt med hjälp av termodynamik, t ex i form av osmotiskt tryck.

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

En konceptuell beskrivning av svälltrycket i systemet montmorillonit/saltvatten visar att bufferten bibehåller ett ansevärt svälltryck även vid mättad saltlösning /6-11/. För kvantifiering av hydraulisk konduktivitet vid mycket höga salthalter (över 10 procent) finns en påtaglig osäkerhet.

Temperatureffekter på jämviktskonstanter för jonbyte är inte väl dokumenterade. Temperatureffekter på svälltryck och hydraulisk konduktivitet vid mycket höga salthalter är inte undersökta.

För system med relativt låga salthalter (under 3,5 procent) finns både konceptuell förståelse och en omfattande mängd mätdata.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Salthaltens betydelse för svälltryck och hydraulisk konduktivitet har studerats för MX-80 och en naturlig smektitisk lera (Friedland). Påverkan av salt kommer att vara liten i praktiken. Två rapporter som beskriver buffertens mikrostruktur, kemi och isoleringsegenskaper visar vad materialuppbyggnaden betyder för buffertens funktionssätt har publicerats /6-12, 6-13/.

Resultaten är relevanta också för återfyllningen.

### **Forskningsprogram**

Svälltryck i kompakterad bentonit vid hög salthalt undersöks i ett pågående samarbete med Posiva, Finland. Projektet syftar till att vidareutveckla beskrivningen av systemet bentonit/vatten/salt bl a med avseende på jonkoncentration i bentoniten vid givna grundvattenförhållanden. Effekter av förhöjd temperatur och andra jonslag än natrium behöver utredas både med avseende på svälltryck och hydraulisk konduktivitet.

## **6.2.16 Jonbyte/sorption**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Buffertens fysikaliska egenskaper påverkas i hög grad av joninnehållet i porvattnet.

Under de kemiska förhållanden som förväntas råda i ett djupförvar är det framför allt den totala salthalten och utbyte från  $\text{Na}^+$  till  $\text{Ca}^{2+}$  som kan påverka egenskaperna i nämnvärd omfattning.

Modelleringen i SR 97 visade att jonbyte i kombination med kalcitupplösning påverkar både pH och buffertens svällförmåga. pH i grundvattnet beräknades stiga med 1–2 enheter när vattnet tränger in i bufferten. Jonbytet kommer att omvandla en del av natriummontmorilloniten i bufferten till kalciummontmorillonit. Detta påverkar svällförmågan. Vid Äspö skulle svälltrycket kunna sjunka från cirka 8 MPa till cirka 4–5 MPa på hundratusen år. Detta påverkar dock inte buffertens funktion.

Myndigheterna har inget att invända mot hur bentonitens långsiktiga förändringar beskrivs i basscenariot men konstaterar att kunskapsnivån vad det gäller bentonitens mineralreaktioner bör kunna utvecklas ytterligare. Den viktigaste osäkerheten är förmodligen kopplad till den långsiktiga utvecklingen av grundvattenkemin, vilket kommenteras i samband med klimatscenariot.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Processen diskuterades inte explicit i FUD-program 98, se även avsnitt 6.2.23.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Processen ingår som en del i modellen för den långsiktiga kemiska utvecklingen, se avsnitt 6.2.23.

## **6.2.17 Montmorillonitombildning**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 konstateras att graden av den allvarligaste montmorillonitombildningen, illitiserings, pessimistiskt kan begränsas genom att betrakta tillgången på kalium.

Myndigheterna bedömer att den kemiska stabiliteten hos buffert och återfyllning är relativt välkänd men att kvarvarande effekter av upphettning i det tidigaste skedet samt inverkan av grundvattnets långsiktiga kemiska förändringar behöver redovisas mera detaljerat.

Myndigheterna anser också att kopplingarna mellan den hydrotermiska utvecklingen och den mekaniska och kemiska utvecklingen bättre behöver belysas för den tidiga utvecklingen i bufferten, eftersom även buffertens långtidsegenskaper kan påverkas av den miljö och de processer den utsätts för under ett tidigt skede.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKB bedömde i FUD 98 att cementering och permanent kontraktion av smektitpartiklarna kan vara ett mera betydande problem än illitiserings. Naturliga bentoniter som undergått cementering genom utfällning av kisel och aluminiumföreningar på grund av värmepåverkan uppvisar t ex låga svälltryck på grund av cementeringseffekter. Verifierande försök planeras i Äspölaboratoriet.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Montmorillonitombildning till icke svällande mineral är undersökt i en studie av Kinnekullelera. Den är redovisad i /6-14/ och stöder användbarheten av den generella arbetsmodellen redovisad 1993 i /6-15/. Slutsatsen är att cementering genom utfällning av löst kisel och aluminium är den mest betydelsefulla processen. Samma slutsats dras av studien med ångpåverkan /6-16/ som också visar att hydrotermal påverkan ger viss cementering vid temperaturer över 100 °C.

Effekten på montmorillonitens stabilitet vid höga pH, (cementporvatten med pH upp till 13,8) undersöks för närvarande inom ramen för ECOCLAY-projektet /6-17/. Montmorillonitens förmåga att buffra höga pH är en väsentlig fråga i SKB:s del av projektet. Målet är att avgöra om ett högt pH når kapseln snabbt med relativt opåverkad bentonit, eller om bentoniten bromsar detta genom att buffra tillräckligt snabbt.

Försöksserien LOT (Long Term Test of Buffer Material) syftar till att utvärdera modeller och hypoteser om fysikaliska egenskaper och mineralogi hos en bentonitbuffert under realistiska förvarsförhållanden. Resultaten från de första försöken visar bl a att ingen montmorillonitomvandling och ingen signifikant förändring av de fysikaliska egenskaperna sker under vattenmättnadsskedet /6-18/.

Bentonitfyndigheterna i centrala USA, där bl a MX-80 hämtas, har undersökts /6-19/. Resultaten visar att det hav där bentoniten bildades och låg kvar i 60 miljoner år har stora likheter med det vatten som förväntas i ett djupförvar i Sverige.

### **Forskningsprogram**

Långtidsstabiliteten för buffertmaterialets egenskaper är den viktigaste frågan i det framtida forskningsprogrammet för bufferten. Insatser kommer att göras inom ett flertal områden:

- I Almeria i södra Spanien finns mycket smektitrika lerfyndigheter som utsatts för olika typer av yttre påverkan. Dessa planeras att studeras i Enresa-projektet BARRA. De viktigaste processerna, ur SKB:s synvinkel, är effekten av förhöjd temperatur och effekten av salt porvatten.
- Försöksresultat, som tidigare har publicerats i arbetsrapporter och tekniska rapporter sammanställs med syfte att publicera materialet i artikelform. Artiklarna kommer att behandla saltpåverkan, upprepad uttorkning, samt effekt av högt pH.
- Fortsatt arbete med mikrostrukturmodellen för bufferten.

Ett av huvudsyftena med LOT-projektet är att söka verifiera att omvandlingen till illit inte är påtagligt snabbare än vad som kan beräknas med Huangs kinetiska illitomvandlingsmodell /6-20/, dvs en kontroll av de laboratoriebestämda konstanterna samt själva modellen.

Det är också möjligt att det kommer att krävas studier av långtidsstabiliteten hos alternativa buffertmaterial.

## **6.2.18 Lösning/fällning föroreningar**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Buffertmaterialet, bentonit MX-80, består förutom av montmorillonit även bl a av andra sk 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 idag 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. Kisel är det vanligaste ämnet i bufferten och det förekommer i en rad olika mineral och faser. Följande processer är inte helt klarlagda:

- Frigörelse av kisel från de olika mineralen.
- Transport av löst kisel till följd av den rådande temperaturgradienten.
- Utfällning av kiselmineral.

Speciellt utfällning av kisel är principiellt komplicerad. Den beror av flera samverkande faktorer och flera tänkbara former förekommer, både kristallina och amorfa.

Den största osäkerheten gäller omfattningen av cementeringsprocesser som följd av lösning, transport och utfällning av kisel eller kisel-aluminium-kalcium-föreningar. Man kan idag inte med rimlig säkerhet förutsäga cementeringens omfattning och konsekvenser.

Myndigheterna konstaterar att kunskapsnivån vad det gäller bentonitens mineralreaktioner bör kunna utvecklas ytterligare. SKI:s konsulter /6-21/ anser rent generellt att utvecklingen av kemin i närområdet ägnats förhållandevis liten uppmärksamhet i SR 97, jämfört med säkerhetsanalyser från andra kärnavfallsprogram. De rekommenderar SKB att förfinna sina metoder att uppskatta porvattensammansättningen i bentonit, bl a genom att beakta att jonbytesreaktioner även involverar tetraedriska och oktaedriska positioner. Det är även önskvärt att parametrar i jonbytes- och ytkomplexeringsmodeller inte enbart utgår ifrån resultat från korttidsförsök.

Myndigheterna föreslår att SKB för att belysa konceptuella osäkerheter parallellt utvärderar flera olika metoder för att uppskatta hur porvattensammansättningen i bentonit utvecklas både på kort och lång sikt. Resultaten ger då även ett mått på osäkerheterna och dessa bör utnyttjas konsekvent för modelleringen av både sorption och lösligheter i bufferten. Det bör visas att sorptionsdata som utnyttjas antingen är kompatibla med hela intervallet av förväntade porvattensammansättningar eller att flera uppsättningar data finns tillgängliga som täcker in hela intervallet. Myndigheterna rekommenderar dessutom SKB att ta hänsyn till utarmningen av buffertens redoxkapacitet som orsakas av radiolys, vilket främst gäller fall då plutonium och americium hålls kvar i bufferten och eventuellt i kapseln.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Processen diskuterades inte explicit i FUD 98, se även avsnitt 6.2.23.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Försöksserien LOT (Long Term Test of Buffermaterial) syftar till att utvärdera modeller och hypoteser om fysikaliska egenskaper och mineralogi hos en bentonitbuffert under realistiska förvarförhållanden. Resultaten från de första försöken visar bl a en mindre omfördelning av kisel och magnesium i temperaturgradienten, utfällning av gips på värmaren och utfällning av gips i de innersta millimetrarna av bentoniten /6-18/, se vidare avsnitt 6.2.23.

## **Forskningsprogram**

Ytterligare modellering och modellutveckling kommer att göras för att bättre kunna beskriva porvattnets och närområdets geokemi, se 6.2.23.

### **6.2.19 Kolloidfrigörelse/erosion**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

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 låga jonstyrkor hos grundvattnet.

Myndigheterna anser att erosion av bufferten bör beaktas som en potentiell källa till kolloider.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

#### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Frigörelse och transport av kolloider har studerats och redovisats i /6-22/. Slutsatsen är att aggregat bildas av smektitpartiklar som kan lossgöras från bufferten och transporteras ut i omgivningen, men att det kräver en vattenströmningshastighet som knappast uppkommer då grundvattenytan återställts efter förvarets förslutning. Aggregatens laddningsfördelning gör att de samverkar med sprickfyllnader och snarare tenderar att fylla igen sprickor än röra sig långt i dem.

## **Forskningsprogram**

Bentoniterosion undersöks i ett nystartat projekt, COLLOID, se avsnitt 8.2.17. Först görs ett pilotförsök för att sedan kunna optimera försöksutförandet. Avsikten är att undersöka om bentonitlera i kontakt med olika elektrolytlösningar bildar kolloider. Grundantagandet är att kolloidbildningen beror av jonstyrka i lösningen, temperatur och bentonittyp (Na eller Ca). Lösningarna i kontakt med bentonitlera analyseras med avseende på kolloidernas storleksfördelning och så långt möjligt koncentrationen av kolloider. När pilotförsöket är utvärderat startas ett optimerat laboratorieförsök. Detta ska mynna ut i experiment i Äspölaboratoriets tunnel (planerat till hösten 2001) och i Äspö sprickzon (2002).

### **6.2.20 Stråлиндucerad montmorillonitomvandling**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

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 montmorillithalten.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **6.2.21 Radiolys av porvatten**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Gammastrålning från bränslet 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 gammarradiolys på utsidan ska bli försumbar.

Myndigheterna rekommenderar SKB att ta hänsyn till utarmningen av buffertens redoxkapacitet som orsakas av radiolys, vilket främst gäller fall då plutonium och americium kvarhålls i bufferten och eventuellt kapseln.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

SKB anser inte att det går att förlita sig på någon redoxbuffrande förmåga hos bufferten för längre tidsperioder och anser därför att området idag inte kräver ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **6.2.22 Mikrobiella processer**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Mikrobiella processer kan under vissa förhållanden 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 bakterierna vara aktiva och ha tillgång till vatten, näring och utrymme. Många bakterier är mycket resistent mot strålning och strålningsintensiteten i bufferten utgör inget hinder för bakteriellt liv där.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD 98 angavs att studier pågår av huruvida bakterier är aktiva i en kompakterad bentonitbuffert. Granskarna underströk vikten av att bakterier studeras.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Bakteriers överlevnad och aktivitet i kompakterad bentonit har undersökts i ett doktorsarbete /6-23/.

Experiment med bakterier i bentonit har även genomförts in situ i Äspölaboratoriet /6-18/. Av olika skäl, bl a porvattnets energitillstånd, kommer bakterier att dehydreras i bufferten med dess höga densitet medan de kan överleva och föröka sig i återfyllningen.

Parallellt med arbetena ovan har bakteriers rörelseförmåga i bufferten studerats /6-24/. Deras överlevnadspotential visade sig vara obefintlig i bufferten medan den är en realitet i återfyllningen.

### ***Forskningsprogram***

Forskningsprogrammet vad gäller mikrobiella processer i buffert beskrivs i avsnitt 5.2.12, som behandlar korrosion av kopparkapslar. Anledningen till detta är att den huvudsakliga säkerhetsmässiga betydelse mikrober skulle kunna ha är genom att producera kopparkorrosanter.

## **6.2.23 Integrerade studier – utveckling vid mättade förhållanden**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Integrerade modellstudier för bufferten vid mättade förhållanden genomfördes för den samlade kemiska utvecklingen.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD 98 togs sikte på att genomföra en integrerad modellering av de kemiska processerna i närområdet. Ett första exempel på en sådan modellering redovisades i SR 97.

SKI efterlyste fler experiment på den mättade buffertens THM-egenskaper. Prototypförvaret skulle enligt SKI inte duga för detta ändamål.



## **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

### **Fältstudier av THMC-utveckling**

Den pågående försöksserien Long Term Test of Buffer Material (LOT) vid Äspö-laboratoriet syftar till att utvärdera modeller och hypoteser om fysikaliska egenskaper och förändringar i mineralogin hos en bentonitbuffert vid förhållanden som kan förväntas i ett KBS-3-förvar. Testserien omfattar totalt sju försökspaket med försökstider på ett, fem eller 20 år. I varje försök placeras ett paket, innehållande värmare, kopparrör, förkompakterade bentonitblock och instrument, i vertikala borrhål på -450 metersnivån i Äspölaboratoriet. Värmarna används för att simulera resteffekten från använt kärnbränsle och styrs till att ge såväl KBS-3-förhållanden (S-paketen, max 90 °C) som mer aggressiva förhållanden (A-paketen, ~130 °C). Det senare för att accelerera tänkbara processer i bufferten. Under försöken registreras effekt, temperatur, tryck och fuktinnehåll i bentoniten.

Referens och exponerat bentonitmaterial analyseras med avseende på fysikaliska egenskaper (t ex svälltryck, hydraulisk konduktivitet och reologi) och mineralogiska egenskaper (t ex katjonbyteskapacitet, joninnehåll och mineralfördelning). Bentonit dopad med Cs-134 och Co-60, till en aktivitet på 1 MBq, har placerats i bentoniten för att studera katjondiffusion. Ett stort antal mikroorganismer, mellan  $10^7$ – $10^9$  celler per gram torr vikt lera, har placerats i utvalda bentonitblock som startkoncentrationer. Materialet analyseras direkt efter blandning, efter 72 timmar och efter avslutat försök. Små vätkaraktäriserade kopparrör placerades i bentoniten på utvalda platser.

Sedan FUD 98 har två pilotförsök (ettårsförsök) avslutats och rapporterats med avseende på konstruktion, fältdata och laboratorieresultat /6-18/. Fyra forskargrupper med respektive inriktning på fysikaliska egenskaper och mineralogi, katjondiffusion, bakterieaktivitet samt kopparkorrosion var engagerade i denna inledande del av projektet. En begränsad millimetertjock utfällning, huvudsakligen av gips, noterades i den varmaste innersta delen av bentoniten. En övergripande slutsats är att inga effekter av degraderande processer, som kunde påverka buffertfunktion, upptäcktes i merparten av bentoniten som följd av vattenmättnad och värmepåverkan under ett års tid. Diffusionsförsöken bekräftade att transport i omättad bentonit är obetydlig. Den apparenta diffusiviteten för kobolt i den mättade bentoniten uppmättes till omkring  $2 \cdot 10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s, vilket är i god överensstämmelse med tidigare laboratorieförsök. Cesiumresultaten var däremot inte möjliga att anpassa till en diffusionsprofil, varför fortsatta laboratorieförsök kommer att genomföras parallellt med fältförsöken. Alla bakterier, utom sporbildande arter, förekom under detektionsgränser i det fältexponerade materialet. Medelkorrosionen av koppar efter försöket uppmättes till  $3 \cdot 10^{-6}$  m/år, vilket är i god överensstämmelse med tidigare modellering av oxiderande förhållanden. Inga tecken på gropfrätning noterades. En förhöjd kopparhalt i bentoniten uppmättes i kopparprovets omedelbara närheten.

I LOT-projektet ingår omfattande mätningar av bentonitens hydrauliska konduktivitet, svälltryck och reologiska egenskaper vid mättade förhållanden. Bestämningar görs för referensmaterial och material som utsatts för olika exponering i försöken, dvs material från olika positioner i försökspaketen. Försöksmaterialet undersöks både i ostört fälttillstånd samt efter återpreparering enligt samma standardmetod som för referensmaterialet. Resultaten från laboratoriebestämningarna av de avslutade ettårsförsöken visade inga signifikanta förändringar av fysikaliska egenskaper som följd av vattenmättnad under KBS-3-liknande förhållanden.

## **Forskningsprogram**

### **Fältstudier av THMC-utveckling**

Pågående ettårsförsök med förhöjd temperatur (A0 försöket) i LOT-projektet kommer att avslutas och analyseras under 2001 i enlighet med provningsprogrammet. De tre pågående femårsförsöken kommer att avslutas och analyseras under 2004 /6-18/.

### **Modellstudier kemisk utveckling**

SKB håller med myndigheterna om att den kemiska modelleringen av närområdet bör utvecklas ytterligare. Målet med detta forskningsområde är att vidareutveckla den kopp-lade modell för jonbyte, upplösningutfällning och diffusion som användes i SR 97 för att kunna modellera den tidsberoende utvecklingen av vattenkemin i närområdet. I bufferten kommer följande processer att studeras:

- Utveckling av jonbytes/ytmodellen för bentonit genom att beakta Donnan-jämvikts-egenskaperna hos montmorillonit (se avsnitt 6.2.15), ny kunskap om bentonitens ytegenskaper och de varierande hydrologiska förhållandena under mätnadsprocessen.
- Betydelsen av mängden, fördelningen och tidsberoendet av föroreningar i bufferten och deras betydelse för redox- och pH-buffring i närområdet.
- Bestämning av lösligheter, sorptions- och diffusionskoefficienter för radionuklider till följd av vattenkemins tidsberoende utveckling.

Modellen utvecklas och testas med den stora mängd kemiska data som finns från SKB:s tidigare buffertforskning samt ny kunskap från övriga forskningsprogrammet. Nya experimentella data kommer att fås från FEBEX Mock-up-experimentet och analogprojektet BARRA. Jonbyte studeras också inom LOT-projektet.

### **THM-modellen för mättade förhållanden**

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 tills vidare att ske i samma omfattning som tidigare. Dessutom ska effekten av töjningshastigheten på buffertens styvhet studeras för att avgöra om de framtagna sambanden kan extrapoleras till mycket snabba förlopp som skulle kunna inträffa vid en jordbävning. Ytterligare fenomen som ska studeras är effekten av mycket snabb kompression på vattenmättad bufferts integritet.

## **6.2.24 Radionuklidtransport – advektion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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/m<sup>3</sup> är transportkapaciteten för diffusion minst 10 000 gånger högre än den för advektion.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **6.2.25 Radionuklidtransport – diffusion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Transporten av radionuklider genom bufferten sker med olika diffusionsmekanismer. Det är klarlagt att vissa katjoner kan ha höga diffusiviteter (transporteras effektivt). 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 elektrostatiske krafterna mellan de negativt laddade ytorna och anjonen. Anjonexklusion minskar avsevärt den tillgängliga porositeten för diffusion av anjoner. Vid höga salthalter blir effekten av anjonexklusion mindre och i blandningar av bergkross och bentonit är den försumbar.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD 98 redovisades laboratorieexperiment med ytdiffusion. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Försök med diffusion av radionuklider i buffert har genomförts i Äspölaboratoriet, dels i CHEMLAB-sonden, dels i LOT-försöken, se avsnitt 6.2.23. Både laboratorie- och CHEMLAB-experiment med diffusion av cesium, strontium och kobolt i bentonit har utförts för SKB /6-25/.

**Tabell 6-2. Värden för  $K_d$  och  $D_a$  från CHEMLAB-försöken och laboratorieexperiment.**

	CHEMLAB-försök		Laboratorieexperiment	
	$\log K_d$ [ $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ]	$D_a$ [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ]	$\log K_d$ [ $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ]	$D_a$ [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ]
Cs <sup>+</sup>	1,8	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \pm 0,35$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-8}$
Sr <sup>2+</sup>	1,1	$7 \cdot 10^{-8}$	$1,56 \pm 0,32$	$(9 \pm 1) \cdot 10^{-8}$
Co <sup>2+</sup>	2,4	$4 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \pm 0,3$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-9}$

I CHEMLAB-försöket används MX-80-bentonit och radionukliderna Sr-85, Cs-134, Co-57, I-131 och Tc-99. I tabell 6-2 ges uppmätta sorptions- och diffusivitetsdata samt en jämförelse med data från laboriemätningar (med grundvatten av annan salthalt) /6-26/.

### **Forskningsprogram**

Resultat från experimenten i Äspölaboratoriet är delvis oväntade för ämnen som uppvisar ytdiffusion. Detta ska utredas ytterligare med laborieförsök.

Processen ingår i datorprogrammet NUCTRAN/COMP23 som beräknar radionuklidtransport i närområdet. Programmet för utvecklingen av detta redovisas i avsnitt 7.3.

## **6.2.26 Radionuklidtransport – sorption**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

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 lantanoider bildar ytkomplex. Nuklider sorberade som ytkomplex kan inte transporteras med ytdiffusion.

Distributionskoefficienten  $K_d$  är ett uppmätt värde som i strikt mening bara gäller mätförhållandena och det är vanskligt att extrapolera till andra förhållanden. Fallet med sorption i högkompakterad bentonit är särskilt komplicerat eftersom så gott som allt vatten är interlamellärt och det kan vara svårt att definiera kemin. Detta gör att resultaten från sorptionsmätningar i batchförsök inte går att tillämpa.

Baserat på jämförelser med andra program anser en av SKI:s konsulter /6-21/ att SKB:s realistiska  $K_d$ -värden är rimliga. SKB:s val av pessimistiska värden anses dock vara tveksamt då det sannolikt krävs  $K_d$ -värden som är två tiopotenser lägre än de realistiska för att täcka in hela osäkerhetsintervallet.

För att belysa konceptuella osäkerheter föreslår myndigheterna att SKB parallellt utvärderar flera olika metoder att uppskatta hur porvattensammansättningen i bentonit utvecklas både på kort och lång sikt. Resultaten ger då även ett mått på osäkerheterna och dessa bör utnyttjas konsekvent för modelleringen av både sorption och lösligheter i bufferten. Det bör visas att sorptionsdata som utnyttjas antingen är kompatibla med hela intervallet av förväntade porvattensammansättningar eller att flera uppsättningar data finns tillgängliga som täcker in hela intervallet.

Enligt Kasam utnyttjas inte kunskaperna om bentonitens egenskaper på ett optimalt sätt då endast konditionella parametrar utnyttjas för att beskriva sorption. Mera sofistikerade sorptionsmodeller borde tas fram för de viktigaste nukliderna.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD 98 konstaterades att konstanter för sorption (och diffusion) av radionuklider sammanfattats och rapporterats inför SR 97. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

En del sorptionsmätningar av radionuklider på bentonit har gjorts efter FUD 98 i samband med diffusionsförsöken i CHEMLAB-sonden /6-25/.

### ***Forskningsprogram***

Detaljerad kunskap om sorption i bentonit är inte av kritisk betydelse för funktionen av ett KBS-3-förvar, se text SR 97 Huvudrapport del II, figur 9-41. SKB avser därför inte driva egna studier inom området. Processen har större betydelse i koncept med kapslar med kortare livslängd och/eller mäktigare buffert och studeras därför i andra länder. SKB kommer att följa den internationella utvecklingen inom området.

Processen ingår i datorprogrammet NUCTRAN/COMP23 som beräknar radionuklidtransport i närområdet. Programmet för utvecklingen av detta redovisas i avsnitt 7.3.

## **6.2.27 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, dvs inuti kapseln, men också av de kemiska förhållandena i bufferten.

Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 4.2.14 och utvecklingen av den kemiska miljön i bufferten i avsnitt 6.2.23. I kommande säkerhetsanalyser planeras för samma typ av specieringsberäkningar för bl a buffertmiljön som i SR 97.

## **6.2.28 Radionuklidtransport – kolloidtransport genom bentonit**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Ett av kraven på buffertmaterialet är att kolloidala partiklar ska filtreras.

Myndigheterna håller med SKB om att kolloidtransport sannolikt inte får en avgörande betydelse så länge bufferten förblir intakt samt så länge grundvattnets sammansättning inte förändras avsevärt. Inverkan av kolloider bör utvärderas för fall då bufferten inte fungerar som avsett, t ex beroende på fel vid tillverkning och inplacering.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Kolloider i närområdet, t ex från de material som finns där, är viktiga och inte fullt så väl studerade som de naturliga kolloiderna. Försök genomförs för att ytterligare stödja slutsatsen att bentonitlera fungerar som ett filter för sådana partiklar.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Bufferten ska förhindra att kolloider med radionuklider tränger ut från en skadad kapsel. För att grundligt pröva bentoniten i det här avseendet genomförs experiment med diffusion av organiska kolloider i en kompakterad bentonitbuffert som en del av ett doktorsarbete. De organiska kolloider som används är rörligare än mineralkolloider, vilket är vad bufferten egentligen ska skydda mot. Preparerade organiska kolloider fungerar bättre som testsubstanser, just därför att de har en större förmåga att tränga in i leran. Resultaten av flera års experiment med detta finns rapporterade /6-27/. Organiska kolloider diffunderar genom bentonit med ungefär samma hastighet som negativa joner som  $I^-$  och  $Cl^-$ . Vid höga jonstyrkor rörde sig kolloidierna något snabbare, vilket var oväntat. Studierna är en del av ett doktorsarbete som kommer att pågå ytterligare några år.

### ***Forskningsprogram***

Studierna av kolloidtransport genom bufferten kommer att fortsätta. De viktiga frågorna är porgeometrins betydelse för diffusionen samt möjligheten för radionuklidtransport med kolloider.

## 7 Återfyllning

Återfyllningen i tunnlarna är ingen barriär i sig själv i KBS-3-konceptet. Den är däremot nödvändig för att bufferten och berget ska få önskad funktion. De krav som ställs på återfyllningen är:

- Återfyllningen ska ha en täthet som minimerar buffertens expansion uppåt. Därigenom bibehålls buffertens densitet.
- Återfyllningen ska ha en hydraulisk konduktivitet som är jämförbar med den i det omgivande bergets. Deponeringstunnlarna kan annars utgöra konduktiva vägar som påverkar vattenomsättningen i förvaret.
- Återfyllningen ska uppnå ett visst svälltryck mot taket för att motstå blockutfall och bibehålla en svällförmåga som kan täta eventuella effekter av kanalbildning och kryp-rörelser i återfyllningen. I FUD 98 och SR 97 sattes detta svälltryck till minst 100 kPa. Svälltrycket kommer att bli föremål för ytterligare utredningar.

Återfyllningen får inte ha någon negativ påverkan på barriärerna i förvaret. Detta ställer en del krav på den kemiska sammansättningen. Återfyllning med montmorillonit och bergkross som huvudkomponenter anses som särskilt lämpliga i detta avseende.

I SR 97 bestod återfyllningsmaterialet schablonmässigt av en blandning av 15 procent MX-80 bentonitlera och 85 procent bergkross. I ett verkligt fall kommer proportionerna att anpassas efter de kemiska förhållandena, i första hand grundvattnets salthalt, på förvarsplatsen så att återfyllningen får önskade egenskaper.

### 7.1 Initialtillstånd för återfyllningen

#### 7.1.1 Variabler

För att beskriva återfyllningen används i SR 97 samma uppsättning variabler som för bufferten, se tabell 6-1. Bergkrosset, som typiskt utgör 85 procent av återfyllningen, inkluderas i variabeln föroreningshalter.

Initialtillståndet, dvs värdet dessa variabler antogs ha vid tiden för deponering beskrevs i huvudrapporten SR 97, avsnitt 6.4 (tillsammans med bufferten). I det följande beskrivs forskningsprogrammet kring initialtillståndet för de olika variablerna i återfyllningen.

#### 7.1.2 Geometri

Återfyllningens mått ges av måtten hos tunnlarna.

#### 7.1.3 Porgeometri

Den initiala porgeometrin (porositeten) hos återfyllningen följer trivialt av dess materialspecifikation. Porositeten hos återfyllningen i SR 97 var 30 procent.

#### **7.1.4 Strålintensitet**

Den initiala strålintensiteten i återfyllningen är försumbar.

#### **7.1.5 Temperatur**

En bestämning av den initiala temperaturen i återfyllningen är trivial. Denna kommer att vara nära bergets initiala temperatur.

#### **7.1.6 Smektithalt**

##### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Återfyllningens sammansättning behandlades inte utförligt i SR 97 bl a eftersom den inte anpassades till platsernas egenskaper.

##### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 konstaterades att kraven på återfyllningen, val av material och teknik var föremål för ytterligare undersökning.

##### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Se avsnitt 7.2.2.

##### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 7.2.2.

#### **7.1.7 Vattenhalt**

Den initiala vattenhalten i återfyllningen följer triviale av dess materialspecifikationer. Det är en parameter som kan kontrolleras vid blandningen av materialet. I SR 97 hade återfyllningsmaterialet en initial vattenmättnadsgrad på 65 procent.

#### **7.1.8 Gashalter**

Den initiala gashalten i återfyllningen följer triviale av dess specifikationer.

Porositeten hos återfyllningen i SR 97 var 30 procent och vattenmättnadsgraden 65 procent, vilket gör att luften i ett tunnelsystem initialt upptar cirka tio volymprocent.

#### **7.1.9 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 kommer deponeringshål att hållas dränerade och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av 1 atm (cirka 0,1 MPa) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa.



### **7.1.10 Svälltryck**

Svälltrycket utbildas när buffert och återfyllning närmar sig full vattenmättnad. Initialt finns inget svälltryck.

### **7.1.11 Smektitsammansättning**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 hade lerdelen i återfyllningen samma sammansättning som bufferten, se avsnitt 6.1.11.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Se avsnitt 7.2.2.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Se avsnitt 7.2.2.

#### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 7.2.2.

### **7.1.12 Porvattensammansättning**

Vattnet i återfyllningen är en blandning av vatten från bergkrosset, bentonitens ursprungliga vatten samt vatten som tillsätts vid blandningen. Dess sammansättning beror till största delen av vilket vatten som tillförs vid deponeringen.

### **7.1.13 Föroreningshalter**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

De naturliga föroreningarna i bentoniten är av underordnad betydelse i återfyllningen, eftersom den består till 85 procent av krossat berg som i sin tur består av mineral som liknar bentonitens föroreningar. Se vidare den mineralogiska beskrivningen av geosfären.

En relaterad fråga gäller mängder och typer av kvarlämnade material i deponeringshål och tunnlar. Detta beskrivs i avsnitt 14.5.7.

Myndigheterna anser att möjliga negativa effekter som kan uppstå beroende på närvaro av kvarglömda material behöver belysas. Detta behandlas i avsnitt 7.2.16.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

## **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

Se avsnitt 7.2.2.

## **7.2 Processer i återfyllning**

### **7.2.1 Översikt av processer**

I återfyllningen sker i princip samma processer som i bufferten (se avsnitt 6.2.1 för en överblick) dock ibland i en annan omfattning. Dessutom spelar bergkrossen (definierat som förorening i återfyllningen) en delvis annan roll än buffertens föroreningar, bl a genom att bidra till sorption. I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i återfyllningen.

### **7.2.2 Integrerade studier – sammansättning och funktion**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

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. Eftersom bentonitdensiteten är låg blir egenskaperna mycket känsliga för saltinnehållet. Detta medför att sammansättningen 15 procent bentonit och 85 procent bergkross kan 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 SR 97. Kraven på återfyllningens funktion (svälltryck, konduktivitet) kopplar starkt till dess halt av smektit eller andra svällande mineral.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I FUD-program 98 konstaterades att kraven på återfyllningen, val av material och teknik var föremål för ytterligare undersökning.

## **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Återfyllningens sammansättning har diskuterats i /7-1/. Där bedöms en naturlig lera av typ Friedland Tön som likvärdig eller överlägsen blandningar av 30 procent MX-80 och 70 procent bergkross från funktionssynpunkt. De preliminära slutsatserna är att packningsegenskaperna hos den naturliga leran är likvärdiga med blandningar av bentonit och bergkross. Bearbetning och hantering är enklare och ekonomin är konkurrenskraftig.

I ett omfattande laboratorieprogram har blandningar av 0–30 procent bentonit och krossat berg undersökts i samband med installation av Backfill and Plug Test i Äspö-laboratoriet /7-2/. I detta program har egenskaperna vid både mättade och omättade förhållanden studerats och en materialmodell, som är samma som för bufferten men med andra parametrar, utvecklats. /7-3, 7-4, 7-5/. Vid applicering av modellerna på det fältblandade materialet som används i fältförsöket har följande problem framkommit:

- Eftersom återfyllningsmaterialet är relativt inhomogent och känsligt för kanalbildning vid kraftigt vattenflöde fås stor spridning i resultaten vid mätning i laboratorieskala av hydrauliska konduktiviteten.
- Inhomogeniteten och känsligheten för kanalbildning gör också att det samband mellan hydraulisk konduktivitet vid mättat och omättat tillstånd, som använts för att modellera vattenmättnadsfasen hos bufferten, inte tycks kunna användas för återfyllningar som består av blandningar av bentonit och krossat berg. Vattenmättnaden går långsammare eftersom den konduktivitet som mäts i laboratoriet domineras av enstaka kanaler, medan vattenmättnaden måste ske i hela återfyllningen som tycks ha betydligt lägre konduktivitet mellan kanalerna.

Modellerna och förståelsen av de hydro-mekaniska processerna i bufferten är till hjälp för förståelsen av processerna i återfyllningen men kan alltså inte appliceras direkt.

### **Forskningsprogram**

Forskningen om återfyllning med blandningar av bentonit och krossat berg görs för närvarande till stor del inom ramen för fältförsöket Backfill and Plug Test i Äspö-laboratoriet.

Syftet med försöket är att:

- Ta fram och testa olika material och packningstekniker för att återfylla utsprängda tunnlar.
- Testa återfyllningens funktion och samverkan med omgivande berg i full skala i utsprängda tunnlar.
- Utveckla teknik för att bygga pluggar och testa funktionen.

Återfyllningen och kringliggande berg är instrumenterade med vattentrycksmätare, totaltrycksceller, termoelement, fuktmätare, tryckcylindrar och utrustning för att mäta den lokala hydrauliska konduktiviteten.

Följande försök görs efter det att återfyllningen vattenmättats:

Vattentransport vid mättade förhållanden studeras med flödestester. Vattentransporten studeras:

- Genom återfyllningens centrala delar.
- I kontaktzonen mellan återfyllning och golv.
- I kontaktzonen mellan återfyllning och tak.

Svällning och mekanisk växelverkan mellan återfyllning och närfältsberg studeras med svälltrycksmätning och tryckcylindrar. Med totaltryckscellerna, som placerats i taket och på golvet, kan svälltrycksutvecklingen under och efter vattenmättnaden mätas. Genom att stegvis trycksätta tryckcylindrarna (som också installerats i taket och på golvet) och mäta tryck och deformationer kan återfyllningens mekaniska egenskaper i kontaktzonen med berget studeras.

Efter avslutade försök rivs pluggen och återfyllningen grävs ut samtidigt som en omfattande provtagning görs.

Studier av möjligheten att använda naturliga leror som återfyllningsmaterial kommer att göras dels genom fortsatta fältförsök på Friedland lera, där framför allt packningsegenskaperna och kompressionsegenskaperna ska testas och utvärderas, dels med försök på bentonit från Milos i Grekland. Den senare leran har välkända goda hydrauliska egenskaper men behöver prövas både beträffande packningsegenskaper och kompressibilitet.

Inventeringen av alternativa återfyllningsmaterial kommer att fortsätta.

### **7.2.3 Stråldämpning/värmealstring**

Processen kan försummas i återfyllningen.

### **7.2.4 Värmetransport**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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. Tunnlarnas 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.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

#### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Temperaturberäkningar och mätresultat från prototypförvaret i Äspölaboratoriet kommer dock att erhållas. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **7.2.5 Vattentransport vid omättade förhållanden**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 konstaterades allmänt att återfyllningens funktion behöver belysas bättre. Inga specifika frågor kring denna process identifierades dock i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Forskning om återfyllningens egenskaper i omättat tillstånd har under senaste åren gjorts inom Äspöprojektet på blandningar av bentonit och krossat berg.

Porundertrycket som funktion av vattenkvot och bentonithalt har bestämts, likaså den hydrauliska konduktiviteten som funktion av vattenmättnadsgrad och bentonithalt /7-2, 7-4/.

Dessa samband har sedan uttrycks i matematisk form och används i beräkningar av vattenmättnadsförloppet /7-2, 7-4/. Återfyllningsmaterialet som framställts för fältförsöken är inhomogent vilket givit en stor variation i bevätningshastigheten i laboratorieförsöken. Den omättade hydrauliska konduktiviteten är låg och ger en långsam bevätning om inget yttre vattentryck påförs. Se också avsnitt 7.2.2.

### ***Forskningsprogram***

Den kopplade THM-modellen för omättade förhållanden i bufferten, som kommer att vidareutvecklas och beskrivs i avsnitt 6.2.12, kan användas även för återfyllningen.

## **7.2.6 Vattentransport vid mättade förhållanden**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Vattengenomsläppligheten hos återfyllningen efter vattenmättnad bestäms av montmorillonitnehållet, porvattensammansättningen och densiteten. Till skillnad från bufferten kan återfyllningen 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.

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 konduktiviteter förutsätter att inga kanaler eller glipor finns. Även effekterna av mycket höga salthalter är otillräckligt utredda. Återfyllningens funktion i allmänhet identifierades som ett prioriterat forskningsområde i SR 97.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Forskning om återfyllningen har under senaste åren dels gjorts inom Äspöprojektet (laboratorie- och fältförsök) på blandningar bentonit och krossat berg och dels med laboratorieförsök på ett alternativt naturligt lermaterial (Friedlandlera).

På blandningar bentonit och krossat berg har bl a följande undersökningar gjorts: bestämning av hydrauliska konduktiviteten som funktion av bentonithalt, densitet och salthalt i tillsatt vatten. Resultaten visar bl a att salthalten har stor inverkan på egenskaperna på grund av att den inblandade bentonitens densitet i porutrymmet mellan partiklarna från det krossade berget är låg vid bentonithalter på 30 procent och därunder /7-1/.

Vid en densitet av  $1\,900\text{ kg/m}^3$  (torrdensitet  $1\,430\text{ kg/m}^3$ ) är konduktiviteten hos den naturliga Friedlandleran cirka  $10^{-10}\text{ m/s}$  och svälltrycket något mer än 200 kPa då salthalten är 3,5 procent. Denna densitet ger ett svälltryck av minst 100 kPa, dvs erforderligt tryck för att stödja bergtaket i tunnlar, oberoende av saltinnehållet. För blandningar av 30/70 procent bentonit/sand med densiteten  $1\,900\text{ kg/m}^3$  i vattenmättat skick upphör i det närmaste svälltrycket redan då porvattnet är något bräckt /7-6/.

Vad gäller fenomenet flyttillstånd, se avsnitt 6.2.5.

### **Forskningsprogram**

Se avsnitt 7.2.2.

### **7.2.7 Gastransport/gaslösning**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 konstaterades allmänt att återfyllningens funktion behöver belysas bättre. Inga specifika frågor kring denna process identifierades dock i SR 97 eller dess granskning.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### **Forskningsprogram**

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. För gaslösning se avsnitt 6.2.6.

## **7.2.8 Svällning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 konstaterades allmänt att återfyllningens funktion behöver belysas bättre. Inga specifika frågor kring denna process identifierades dock i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 6.2.4 och 7.2.2.

## **7.2.9 Mekanisk växelverkan återfyllning/närfältberg**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Återfyllningens permeabilitet styrs av 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 närfältberg:

- Återfyllningens svälltryck och tyngd.
- Indirekta effekter av buffertens uppsvällning.
- Kryprorelser i berget runt tunneln.
- Blockutfall i tunnelns tak och väggar.

Svälltrycket mot taket är beroende av vilken densitet som kan uppnås vid packningen. Svårigheterna med packning mot taket gör det svårt att garantera ett visst svälltryck. Svälltrycket uppkommer av bentoniten i utrymmet mellan bergkrosset 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.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Se avsnitt 7.2.2.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Se avsnitt 7.2.2.

## **Forskningsprogram**

SKB kommer att starta ett projekt vars huvudmål är att etablera en designmetod för att kvantifiera effekten av återfyllningens mekaniska egenskaper på en granitisk berggrund. Se även 7.2.2. Konvergens av tunnlar till följd av kryprorelser i berget behandlas i avsnitt 8.2.9.

### **7.2.10 Termisk expansion**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

#### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ingen ny kunskap har tillkommit.

## **Forskningsprogram**

Betydelsen av denna process kommer att illustreras med enkla överslagsberäkningar. Detta kommer att bli ett underlag till nästa säkerhetsanalys och beräknas vara klart under 2002.

### **7.2.11 Advektion**

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Återfyllningen har en hydraulisk konduktivitet respektive diffusivitet som ligger i ett område där både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer. Beräkningar visar dock att även med ett mycket högt vattenflöde genom återfyllningen blir uttransporten av en given radionuklid högst dubbelt så stor som i fallet med endast diffusion /7-7/. Se även avsnitt 7.2.6 och vad gäller radionuklider avsnitt 7.2.21.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat.

#### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Se avsnitt 7.2.6.

## **Forskningsprogram**

Se även avsnitt 7.2.2. Vad gäller advektion av radionuklider, se avsnitt 7.2.21.



## **7.2.12 Diffusion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **7.2.13 Osmos**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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 idag kan uppnås finns risk för avgörande försämring av återfyllningens funktion redan vid relativt låga salthalter i grundvattnet (några procent TDS). Återfyllningens funktion i allmänhet identifierades som ett prioriterat forskningsområde i SR 97. Se även avsnitt 6.2.15.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Betydelsen av salthalten och dess inverkan på de fysikaliska egenskaperna som följd av bl a jonbytesegenskaperna hos blandningar av MX-80 och bergkross samt hos naturlig Friedlandlera har klarlagts i /7-6/, se avsnitt 7.2.2.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 6.2.15.

## **7.2.14 Jonbyte/sorption**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Ett jonbyte från natrium till kalcium leder till likartade effekter som hög salthalt i grundvattnet (se avsnitt 7.2.13), dvs porgeometrin i återfyllningsmaterialet förändras och återfyllningen riskerar att förlora sina svällande och tätande egenskaper.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 6.2.23 och 7.2.13.

## **7.2.15 Montmorillonitomvandling**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Det som sägs om motsvarande process i bentoniten, avsnitt 6.2.17, är i stort tillämpligt även för återfyllningen.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Det som sägs om motsvarande process i bentoniten, avsnitt 6.2.17, är i stort tillämpligt även för återfyllningen.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Det som sägs om motsvarande process i bentoniten, avsnitt 6.2.17, är i stort tillämpligt även för återfyllningen.

### ***Forskningsprogram***

Det som sägs om motsvarande process i bentoniten, avsnitt 6.2.17, är i stort tillämpligt även för återfyllningen. Den lägre densiteten gör att omvandlingen kan gå snabbare i bufferten, samtidigt som den lägre temperaturen gör att omvandlingen kan gå långsammare. Samma modell som för bufferten kan dock användas.

## **7.2.16 Lösning/fällning föroreningar**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Naturliga föroreningar i bentonitmaterialet (se avsnitt 6.1.13) har ingen betydelse för återfyllningens långsiktiga funktion. I SR 97 avfärdades också betydelsen av konstruktions- och kvarglömnda material med hänvisning till att mängderna var små.

Myndigheterna konstaterar följande: ”Hur stora mängder organiskt material som kan lämnas kvar vid förslutning eller på om det är acceptabelt att lämna större mängder cement i direkt anslutning till deponeringshålen beskrivs inte i SR 97. Myndigheterna anser att möjliga negativa effekter som kan uppstå beroende på närvaro av sådana material behöver belysas.”

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

En kritisk genomgång av de föroreningar och strömaterial som kan tänkas i ett förvar /7-8/ och deras betydelse för den långsiktiga säkerheten planeras att genomföras under perioden.

Betydelsen av cement i förvaret behöver belysas ytterligare eftersom det är en fördel att kunna använda cement och betong vid konstruktion av djupförvaret. Möjligheterna till ett samarbete med Posiva på det området ska undersökas. För reaktioner mellan bentonit och betong i ett förvar, se även kapitel 18.

## **7.2.17 Kolloidfrigörelse/erosion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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. Då bevätningen utbildats helt strävar återfyllningen att expandera och konsolidera gränzonen. Vid den låga densitet som återfyllningen sannolikt kommer att få vid tunneltaket räcker emellertid inte expansionsförmågan hos återfyllningen enligt förvarets specifikation för att upprätthålla kontakt med tak och övre vägghälften i tunnlar och risken för borttvättning och betydande heterogenitet hos återfyllningen kvarstår. Detta kan undvikas genom att återfylla med block med högre bentonithalt nära tunneltaket.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Se avsnitt 6.2.19.

## **Forskningsprogram**

Erosion och kolloidbildning av bentonitmaterialet i återfyllningen fortgår på samma sätt som i bufferten, se därför 6.2.19 för forskningsprogram. Konsekvenserna kan dock bli större på grund av den lägre halten av montmorillonit, vilket skulle kunna medföra erosion av lermaterialet. Detta ger ökad hydraulisk konduktivitet och lägre svälltryck.

### **7.2.18 Strålinducerad montmorillonitombildning**

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och bedöms därför vara försumbar även i återfyllningen.

### **7.2.19 Radiolys av porvatten**

Processen bedöms vara försumbar i bufferten och bedöms därför vara försumbar även i återfyllningen.

### **7.2.20 Mikrobiella processer**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

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. En bakteriell aktivitet i återfyllningen kan därför vara fördelaktig eftersom den kommer att utgöra ett betydande bidrag till syre-reduktionen där.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

#### ***Nyväunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

## **Forskningsprogram**

Se avsnitten 6.2.22 om sulfatreducerande mikrober i bentonit och grundvatten och 8.2.15 om mikrober i berggrunden.

### **7.2.21 Radionuklidtransport – advektion**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Återfyllningen har en hydraulisk konduktivitet respektive diffusivitet som ligger i ett område där både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer, se 7.2.11.

Myndigheterna anser att det för beskrivningen av transporten mellan buffert och återfyllning och omgivande berg vore av intresse att utvärdera de processer som skulle kunna leda till förändringar av transportegenskaperna. Det förefaller t ex inte otänkbart att

återfyllningen kan omvandlas, så att en preferentiell transportväg bildas invid taket på deponeringstunnlarna. Förändringar av igenfyllda borrhål kan också behöva beaktas.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Målsättningen är att ta fram en integrerad rapport som dels beskriver återfyllningens funktion (se avsnitt 7.2.2), processer som kan påverka denna (se avsnitt 7.2.13) och konsekvenserna som detta kan ha för förvarets funktion. För att utvärdera konsekvenserna kommer datorprogrammet för närområdestransport, COMP23, att modifieras, se avsnitt 7.3.

## **7.2.22 Radionuklidtransport – diffusion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Diffusion av radionuklider i återfyllningen är av underordnad betydelse för förvarets säkerhet. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **7.2.23 Radionuklidtransport – sorption**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 beräknas sorptionskoefficienter för radionuklider i återfyllningen genom sammanvägning av  $K_d$ -värden för bentonit och berg i proportion till återfyllningens sammansättning. I övrigt se avsnitt 6.2.26.

För slutsatser i myndigheternas granskning se avsnitt 7.2.21.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **7.2.24 Radionuklidtransport – speciering av radionuklider**

Specieringen av radionukliderna har betydelse för sorptionen och diffusionen i återfyllningen. Den påverkas av vilken speciering nukliden hade vid randen till återfyllningen, dvs inuti bufferten, men också av de kemiska förhållandena i återfyllningen.

Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 4.2.14. I kommande säkerhetsanalyser planeras för samma typ av specieringsberäkningar för bl a buffertmiljön som i SR 97.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Se avsnitt 4.2.14.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Se avsnitt 4.2.14.

### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 4.2.14.

## **7.3 Integrerad modellering – radionuklidtransport i närområdet**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Radionuklidtransport i närområdet beräknas i SR 97 med modellen COMP23, som hanterar processerna bränsleupplösning, utfällning och lösning av löslighetsbegränsade radionuklider, diffusion genom en specificerad skada i kopparhöljet, diffusion och sorption i bufferten och återfyllning och ut till omgivande geosfär samt kedjesönderfall.

Radionuklidtransport i kapselns inre förenklas vid modellering på följande sätt: Efter att en bestämd karenstid förflutit sedan en skada på kapselns kopparhölje uppkommit antas hela kapselns inre tomrum, cirka 1 m<sup>3</sup>, 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 antas efter karenstiden vara tillgängligt för bränsleupplösningssprocessen, dvs stå i direkt kontakt med allt bränsle utan att

hindras av Zirkaloykapsling eller andra strukturer. Vattnet antas vara ständigt omrört, dvs inga koncentrationskillnader råder mellan olika delar i kapselns inre. Bränsleupplösningens processen bestämmer därefter frigörelsetakten för matrisbundna radionuklider. Segregerade nuklider samt radionuklider i bränslets strukturdelar antas vara tillgängliga för vattenlösning omedelbart efter karenstidens slut. Sorption av radionuklider till kapselns inre delar försummas.

Buffertens mikroporer förväntas hindra all transport av kolloider ut från kapselns inre. Kolloidtransport i kapselns inre hanteras därför inte förutsatt att bufferten helt omger kapseln.

Radionuklidtransport i gasfas hanteras med överslagsberäkningar.

I granskningen av SR 97 framkom följande synpunkter:

- Myndigheterna ansåg att resultaten från SKB:s modell för upplösning av använt bränsle måste anses som otillräckligt dokumenterade för att resultaten ska vara direkt användbara som ett stöd till en konsekvensanalys. För att kunna bibehålla en hög trovärdighet för modeller och beräkningar erfordras att kvaliteten på det experimentella underlaget och de konceptuella osäkerheterna går att bedöma. Konceptuella osäkerheter kan få mycket stora effekter då experimentella data extrapoleras till mycket långa tidsperioder. Eftersom det kan ifrågasättas om kunskapsunderlaget är tillräckligt, anser myndigheterna att SKB i SR 97 borde använt mera robusta antaganden för att uppskatta en övre gräns för bränslets upplösningshastighet. Detta kommenteras närmare i avsnitt 4.2.12.
- Myndigheterna anser också att inverkan av kolloider bör utvärderas för fall då bufferten inte fungerar som avsett, t ex beroende på fel vid tillverkning och inplacering. Detta kommenteras närmare i avsnitt 6.2.28.
- Även om de i SR 97 beräknade lösligheterna troligen är pessimistiska anser myndigheterna liksom flera av SKI:s konsulter att metoden för löslighetsberäkningar kan förbättras. Detta kommenteras närmare i avsnitt 4.2.14.
- Den internationella expertgruppen anser att redovisningen kring COMP23 är oklar. Bland annat fattas en genomgång av hur verifikation, kvalitetssäkring och validering hanterats. En särskild svårighet som måste tas omhand är att koden verkar representera en blandning av teoretiska och empiriska ekvationer.

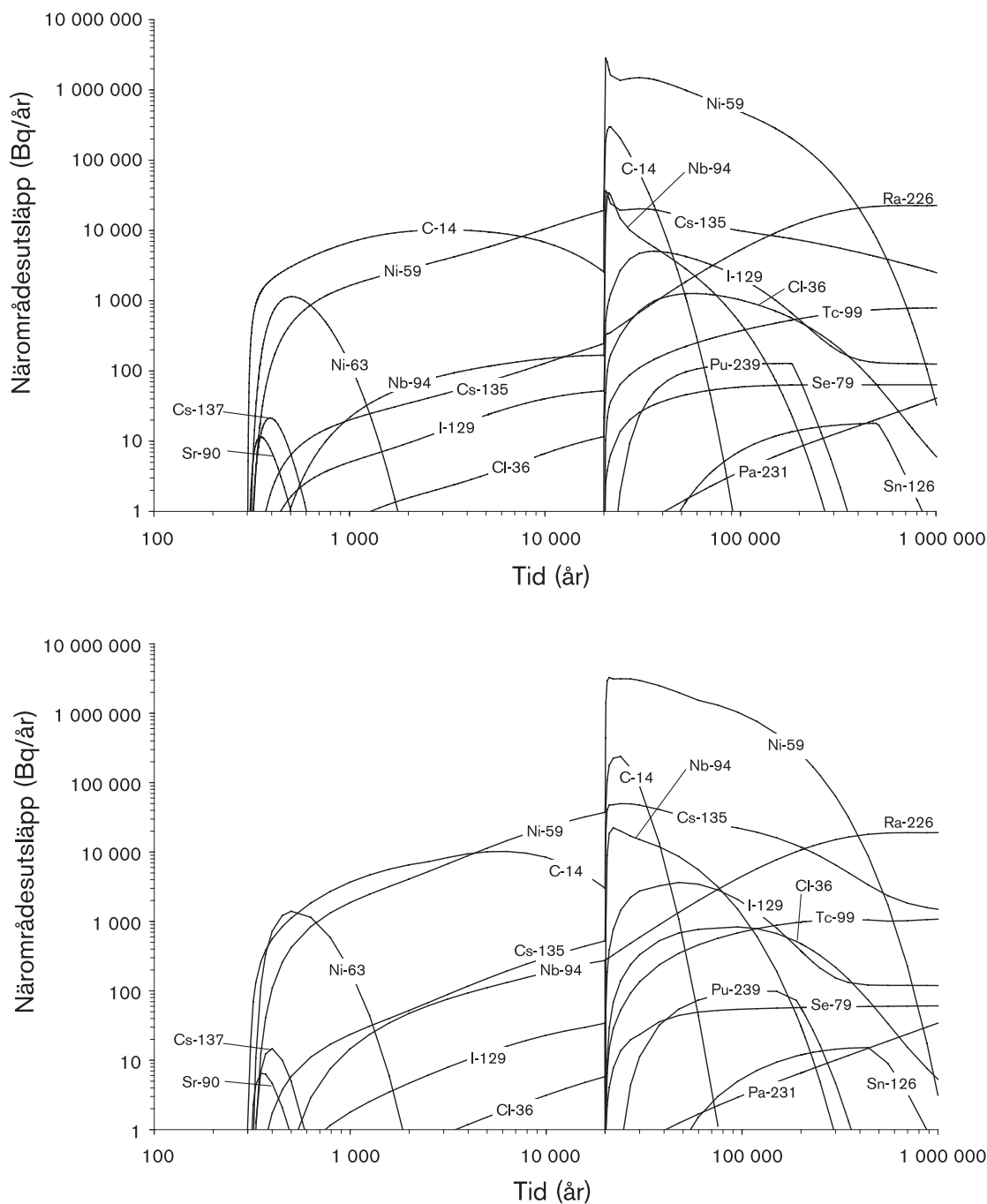
### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Uppgiften var att utveckla och underhålla NUCTRAN/COMP23 som huvudverktyg för radionuklidtransport i närzonen. En av de viktigaste delarna i utvecklingsprogrammet för NUCTRAN/COMP23 var att förena de varianter som existerade till en enda slutgiltig version.

### ***Nyvännen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

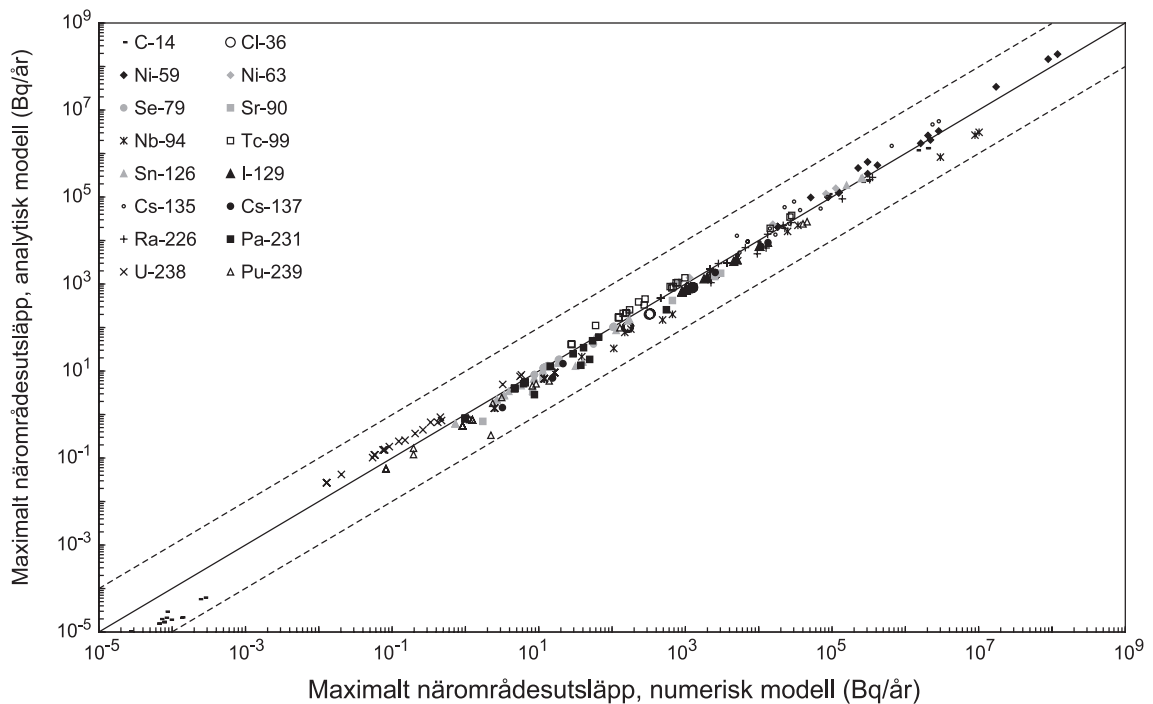
Under perioden efter SR 97 har datormodellen COMP23 förbättrats. Programmet är nu betydligt snabbare och kräver väsentligt mindre minne. De viktigaste delarna från NUCTRAN-versionen som användes för SFL 3-5 har överförts till den version som användes för SR 97.

Sedan SR 97 har en analytisk approximation till COMP23 utvecklats /7-9/, se avsnitt 2.4.1. Överensstämmelsen med den numeriska modellen för beräkningsfallen i SR 97 är i allmänhet mycket god. Figur 7-1 visar en jämförelse av utsläppskurvor från närområdet för ett av beräkningsfallen i SR 97 beräknade med den numeriska närområdesmodellen COMP23 respektive med den analytiska modellen. Resultaten är snarlika för kortlivade (Cs-137, Sr-90, Ni-63), långlivade (Cs-135, I-129, U-238 m fl), sorberande (Pu-239, U-238 m fl), icke-sorberande (Cl-36, I-129), löslighetsbegränsade (Sn-126, Nb-94 m fl) och inväxande (Ra-226, Pa-231) nuklider.



**Figur 7-1.** Utsläppskurvor från närområdet för ett av beräkningsfallen i SR 97, beräknade med numerisk (övre) och analytisk (nedre) modell.





**Figur 7-2.** Jämförelse av maximala årliga utsläpp för de tre platserna och de 16 viktigaste nukliderna i SR 97, beräknade med numerisk respektive analytisk modell. Figuren visar resultaten av nio olika beräkningsfall för var och en av de tre platserna i SR 97.

Figur 7-2 visar en jämförelse av maximala årliga utsläpp i tidsintervallet upp till en miljon år efter förslutning för samtliga osäkerhetsfall i SR 97 /7-10/ inklusive fall där alla parametrar samtidigt ges alltigenom rimliga eller alltigenom pessimistiska värden. I de flesta fall ligger avvikelserna inom en faktor tre.

Den analytiska modellen kommer att användas som ett av verktygen i kommande säkerhetsanalyser, bl a för preliminära probabilistiska beräkningar, se vidare avsnitt 2.4.

### **Forskningsprogram**

SKB avser att behålla COMP23 som huvudverktyg för beräkningar av radionuklidtransport i närområdet. En utredning kommer dock att genomföras för att bedöma om det finns andra alternativ som skulle kunna vara lämpligare. Om ny modell ska utvecklas måste utredningen leda fram till en kravspecifikation för den nya modellen. I första skedet kommer inventering av tillgängliga beräkningsmodeller att genomföras. Detta beräknas vara klart till årsskiftet 2001/2002.

Under tiden kommer arbetet med COMP23 att fortsätta med följande huvudsakliga innehåll:

- Arbetet med verifieringar och dokumentation kommer att fortsätta. Idag finns en utvecklingsdatabas där alla förändringar i koden dokumenteras. COMP23 finns också inlagd i SKB:s gemensamma versionshanteringssystem. Inom den kommande treårsperioden kommer ett så kallat "Assessment Validity Document" /7-11/ att tas fram. I detta dokument kommer bl a granskarnas synpunkter angående verifikation, kvalitetssäkring och validering ovan att hanteras.

- Delade lösligheter införs. Arbetet beräknas vara klart under 2001.
- Pulsspridning från zirkaloyrören och andra strukturdelar införs. I COMP23 kan radionuklider antingen frigöras omedelbart eller i takt med att matrisen omvandlas. Detta gör att hela inventariet i bränslets metalleder frigörs omedelbart. Det vore önskvärt att kunna göra en mer realistisk modellering av metallinventariet. Detta har dock låg prioritet för tillfället.
- Skadeutvecklingens tidsberoende: Idag kan COMP23 beskriva olika typer av kapsel-skador:
  1. En skada med konstant storlek (hål).
  2. En skada vars storlek växer med konstant hastighet.
  3. En skada som växer från en storlek till en annan vid en given tidpunkt.
  4. Total avsaknad av kapsel.

Fler förlopp kommer att införas om behov uppstår, t ex inom arbetet med en skadad kapsels utveckling, se avsnitt 5.2.16.

- Transportkoppling mellan buffert och berg. I första skedet kommer COMP23 att kopplas till en diskret nätverksmodell för att få en mer realistisk beskrivning av när-områdets geometri. Nästa steg är att försöka utveckla en mer realistisk beskrivning av radionuklidtransport mellan buffert och berg. Dagens modell beskriver sprickorna i berget som plan, vilka skär hela buffertdiametern. Förhoppningen är att kunna ta fram en beskrivning som mer överensstämmer med verkligheten. Detta arbete kommer att påbörjas i slutet av 2001.
- Radionuklidtransport i återfyllningen: COMP23 byggs ut så att det är möjligt att beräkna samtidig diffusion och advektion i återfyllningen.

I CHEMLAB-sonden vid Äspö ska transporten av Sr, Cs och I från bentonitbarriären ut till en vattenförande spricka studeras. Experimentet genomförs för att verifiera teoretiska beräkningar som visat att övergångsmotståndet mellan bentonit och vatten är en väsentlig fördröjningsmekanism. Nukliderna är valda för att täcka olika diffusivitetvärden i bentonit. Experimentet beräknas pågå i fem månader under 2003.

## 8 Geosfär

### 8.1 Initialtillstånd för geosfären

Djupförvaret ska förläggas i kristallint berg med granitisk sammansättning. Säkerhetsanalysen tar sin utgångspunkt i situationen som råder då förvaret just konstruerats och förslutits. För geosfären utgör denna situation en störning av det tillstånd som rådde innan förvaret konstruerades. Framför allt påverkas den hydrauliska situationen, dvs grundvattenflöde och grundvattentryck av dräneringen. Även den grundvattenkemiska situationen påverkas av den förändrade grundvattenströmningen som kan medföra att vatten med avvikande sammansättning strömmar mot förvaret. De kemiska förhållandena påverkas också av att förvaret står öppet och olika material tillförs. Storleken av inverkan beror på flera faktorer, bl a hur förvaret konstrueras och hur lång tid förvaret dräneras. Resultatet av platsundersökningen utgör det viktigaste underlaget för att bestämma geosfärens tillstånd efter förslutning (initialtillståndet). Programmet för detta, inklusive bl a metoder som ska användas och förhållanden som ska bestämmas presenteras i särskilda rapporter /8-1/. Forsknings- och utvecklingsfrågor kring mätmetoder behandlas i kapitel 13. Initialtillståndet behandlas därför inte här.

### 8.2 Processer i geosfären

#### 8.2.1 Översikt av processer

Genom värmetransport från bränslet via kapseln och bufferten kommer geosfären att värmas upp. Genom grundvattenströmning omfördelas grundvattnet i geosfärens spricksystem. Även gasströmning kan förekomma. I geosfären råder initialt ett mekaniskt tillstånd som bestäms av de naturliga bergspänningar och spricksystem 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 dvs kompression eller expansion av i övrigt intakta bergblock, samt erosion, dvs vittring av ytberget, framför allt i samband med istider.

Den kemiska utvecklingen efter förslutning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. 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 bl a till att olika vattentyper från olika partier av geosfären blandas. Reaktionen sker mellan grundvattnet och sprickytor och dessa ger upphov till lösning och fällning av sprickmineral. Dessutom sker mycket långsamma reaktioner mellan grundvatten och bergmatrisens mineral. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från förvarskonstruktionen, 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, dvs 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, dvs 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.

## **8.2.2 Värmetransport**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Värme transporteras i berggrunden huvudsakligen genom värmeledning i det intakta berget. Bergarternas värmeledningsegenskaper och värmelagringsegenskaper, vilka båda ges av mineralens sammansättning, är avgörande för processen. I någon mån kan värme även transporteras genom strömning med grundvattnet. Värmeöverföring från bufferten till återfyllningen och till omgivningen utgör processens randvillkor.

Myndigheterna anser att beräkningarna i SR 97 visar att designvillkoret kan uppfyllas genom att reglera mängden bränsle eller avståndet mellan kapslarna.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

I nästa säkerhetsanalys kommer nya temperaturberäkning att genomföras för den aktuella platsen eller platserna.

### **8.2.3 Grundvattenströmning**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I Processrapporten konstateras att de största osäkerheterna kring förståelsen och modelleringen av grundvattenströmningen är förknippade med bergets naturliga heterogenitet. Heterogeniteten innebär att ett statistiskt angreppssätt måste utnyttjas för modellering. Vidare innebär heterogeniteten skalningsproblem vid utvärdering av fältmätningar; dessa skaleffekter bör beaktas då man avsätter parametrar i en modell. Vid modellering av grundvattenströmning var de allvarligaste problemen kopplade just till skalproblematik som bl a ledde till massbalansproblem mellan modeller i olika skalor. Vidare innebar modellverktyget HYDRASTAR:s /8-2/ begränsning i att inte kunna hantera salinitetsdriven strömning problem vid vissa applikationer.

I myndigheternas granskning av SR 97 konstateras att användandet av en stokastisk kontinuummetod (SC) i platsskala inte är ordentligt motiverad. Med den valda diskretiseringen ifrågasätts vidare möjligheten att hantera småskaliga sprickor, borrhål och pluggar, samt möjligheten att optimera förvarsutformningen. Dessa begränsningar innebär även att en mer realistisk beskrivning av slutförvarets funktion försvåras. Vidare ansåg myndigheterna att en mer systematisk utvärdering av modellosäkerheter i regionalmodellerna bör eftersträvas, att den hydrauliska och geokemiska utvecklingen bör integreras, samt hur viktiga parametrar i SR 97 kan mätas under platsundersökningsskedet. Slutligen framfördes viss kritik mot hur syrenedträngning behandlades i samband med förhöjd grundvattenströmning vid klimatscenarier.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 konstaterades att viktiga mål inför framtiden är att undersöka uppskalningsfrågor och regionala eller lokala strömningsmönster, samt att ha tillgång till och öka användningen av diskreta modeller. En applikation med en diskret modell användes redan i SR 97 och utvecklingen på detta område fortsätter, se nedan. Vidare konstaterades att modellverktyget HYDRASTAR bör uppdateras på vissa punkter (bl a hantering av hydraulisk anisotropi och alternativ randvillkorssättning).

Myndigheterna höll i sin granskning med om att uppskalning och den regionala strömningens roll för inströmnings- och utströmningsområden är viktiga frågor. Vidare ansåg man att samspelet mellan ytnära och djupa grundvatten bör studeras närmare för att förstå kopplingen mellan geosfär och biosfär.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Många av de problem som identifierades i SR 97 och FUD-program 98 med HYDRASTAR har tagits om hand genom utveckling i andra modellverktyg. SKB bedriver en utveckling med modellverktyget NAMMU /8-3/ där speciellt kopplingen mellan regional- och lokalmodeller studeras /8-4/. Genom att lokalmodellen ligger inbyggd i regionalmodellen garanteras kontinuitet mellan de olika skalorna. Eftersom NAMMU även i randvillkorssättning är bättre än HYDRASTAR och dessutom kan hantera densitetsdriven strömning, är det troligt att NAMMU kommer att användas mer i framtida analyser på HYDRASTAR:s bekostnad. Detta innebär dock inte någon kursändring utan snarare ett effektivt sätt att erhålla ett flexibelt och allsidigt modellverktyg med hög kvalitet.

Lokalmodeller inbyggda i regionalmodeller, inklusive explicit modellering av tunnlar och bergsalar, har även utförts i hydrogeologimodelleringen inom projekt SAFE /8-5/. Där analyserades även de transienta effekterna av landhöjning och sedimentackumulation. Metodresultaten och erfarenheterna från projekt SAFE är värdefulla för kommande utveckling och användning av modeller inom platsundersökningsskedet.

Frågor om alternativa metoder för att skapa hydrauliska konduktivitetfälten och uppskalning av hydraulisk konduktivitet har analyserats med modellverktyget DarcyTools (tidigare kallat PHOENICS). Med GEHYCO-tekniken i DarcyTools skapas konduktivitetfälten baserade på diskreta spricknätverksmodeller /8-6, 8-7/. De resulterande fälten har egenskaper som väl tyckts beskriva förhållandena på Äspö; vidare tycks fälten ha små skillnader i flöde mellan olika använda diskretiseringsskalor. Detta indikerar att metoden har attraktiva egenskaper vad gäller hantering av uppskalning. Resultat från en pågående övning (Task 5) inom Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes har gett ny kunskap om hur geokemiska data kan användas för att stödja modeller för grundvattenströmning. Task 5 finns ytterligare beskrivet i avsnitt 8.2.21.

### **Forskningsprogram**

Under kommande period kommer främst ett antal modellstudier och projekt för modellutveckling att bedrivas.

Projekten där NAMMU och DarcyTools används och förfinas kommer att fortgå. Målet är att ha två separata modellverktyg som kan användas inom platsundersökningsskedet för både platsförståelse och säkerhetsanalys. Genom att samma verktyg används för både platsförståelse och säkerhetsanalys möjliggörs en samordning av dessa aktiviteter under platsundersökningsskedet. Hur denna samordning sker i praktiken och var ansvaret för samordningen ligger beskrivs översiktligt i två SKB-rapporter /8-8, 8-1/.

Intressanta frågor som kan analyseras med NAMMU och DarcyTools är bl a hur man ska inkorporera en diskret beskrivning upp till blockskala (dvs cirka 1–100 meters skala) i kontinuummodellerna. Målet är att ha tillgång till modeller med en diskret representation av sprickor och tunnlar närmast förvaret. De diskreta modellerna bör i sin tur kunna ligga direkt inbyggda i kontinuummodeller på lokal och regional skala. Dessutom ska modellerna förberedas för en koppling till databasen SICADA och dess visualiseringsverktyg RVS. DarcyTools kommer även att användas för att upprätta uppdaterade modeller av Äspölaboratoriet i både regional och lokal skala.

Parallellt med projekten ovan, där man studerar hur diskreta modeller ska byggas in i kontinuummodeller, kommer även rent diskreta modeller att användas. Projekten att utveckla diskreta modeller har som främsta syfte att öka förståelsen av de flödesrelaterade parametrar som har betydelse för retention, se vidare avsnitt 8.2.23. De diskreta modellerna kan även användas för att öka förståelsen av hur optimering av ett förvar kan ske med avseende på t ex utformning eller säkerhet.

Förutom kontinuummodeller och diskreta modeller fortsätter även utvecklingen av kanalnätverksmodellen CHAN3D.

Frågor om uppskalning av parametrar från en detaljerad skala till skalor relevanta för säkerhetsanalysen kommer att belysas i en modelleringsövning (Task 6) inom Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. I övningen, som baseras på data främst från TRUE-1 och TRUE Block Scale-projekten vid Äspölaboratoriet, ska modeller i olika tids- och rumsskalor användas och utvärderas. Syftet är

att förstå hur olika modeller, som alla kan beskriva fenomen i korta tids- och rumsskalor, fungerar (alternativt måste modifieras) då de appliceras i längre skalor. Detta projekt innefattar både flödes- och transportegenskaper.

Projekt om inströmnings- och utströmningsområden samt kopplingen mellan ytnära och djupt grundvatten planeras. Syftet är att studera dels hur vattendrag, sjöar, lokal topografi samt förekomst och orientering av sprickzoner påverkar strömningsmönstret, dels hur den ytnära hydrologin påverkar utströmningsförhållandena för grundvatten med djupare ursprung. I dessa projekt kan även ansättning av randvillkor på modellernas toppyta studeras. Vid modellering med större realism av den ytnära hydrologin kan det även finnas anledning att fundera över hur randvillkoren formuleras. Frågor kring ytnära hydrologisk modellering berörs även i avsnitt 9.5. Modellberäkningar kommer även att göras för att bedöma förvarets påverkan på grundvattenströmning och djup till salt grundvatten under driftsperioden.

Baserat på resultaten från Task 5 inom Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes kommer frågan om att utnyttja geokemiska data för modellering av grundvattenflöde och radionuklidtransport att drivas vidare, se vidare avsnitt 8.2.21. Även modellering av grundvattenströmning vid olika klimatscenarier samt modellering av syrenedträngning i samband med glaciation kommer att initieras. Frågeställningar kring syrenedträngning behandlas ytterligare i avsnitt 8.2.14.

Frågan om huruvida grundvattenströmning bör analyseras kopplat till andra processer, främst termiska eller mekaniska, kommer att bevakas. Ett forum för sådan bevakning är DECOVALEX III (BENCHPAR) där bl a betydelsen av kopplade THM-processer analyseras; dessa frågor diskuteras även i avsnitt 8.2.7. Motiv för modellering av kopplade processer finns troligen främst vid analys av förvarets byggande och inplacering av avfallskapslar /8-9/.

Vad gäller kopplingen mellan mätningar vid platsundersökningar och indata till säkerhetsanalysens modeller, se avsnitt 13.3.

## **8.2.4 Gasströmning/gaslösning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I FUD-program 98 konstaterades att en sammanställning och kunskapsuppbyggnad vad gäller tvåfasflöde och gastransport borde genomföras. I övrigt identifierades inga frågor för ytterligare forskning i FUD-program 98 eller dess granskning.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

En rapport över tvåfasexperiment utförda vid Äspölaboratoriet har publicerats /8-10/. Resultaten av dessa experiment diskuteras även i avsnitt 8.2.18. I detta avsnitt konstateras att för normala djupförvarsförhållanden bedöms tvåfasströmning inte leda till några betydande reduktioner av vattenflödet i sprickor som korsar öppna borrhål /8-10/. Detta indikerar att gasströmning vid borrhål och tunnlar inte är problematiskt för säkerhetsanalysen.

Kunskapen om tvåfasflöde och gasmigration har sammanställts i ett samarbetsprojekt inom EU och NEA /8-11/. Rapporten identifierar problem, konceptualisering och fortfarande öppna frågor för lagring av använt bränsle i sprickigt berg. Rapporten konstaterar att vissa grundläggande frågor kring tvåfasströmning i sprickigt berg återstår att lösa. Här kan bl a nämnas vilken skala fenomen ska beskrivas på, samt hur parametrar och konstitutiva samband ska bestämmas.

### ***Forskningsprogram***

Behovet av sammanställningen omnämnd i FUD-program 98 kan anses vara omhändertaget i och med EU/NEA-rapporten /8-11/. Vissa frågeställningar har även behandlats i /8-10/.

Förutom specifika detaljer identifierade i /8-11/ som kan kräva ytterligare analys, bedöms området idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

### **8.2.5 Rörelse i intakt berg**

I SR 97 avses med rörelse i intakt berg den i huvudsak elastiska rörelse utan synlig sprickbildning som sker vid måttliga laster. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning för denna process.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

En testprogram för bestämning av mekaniska egenskaper hos den i Äspölaboratoriet vanligt förekommande dioriten har genomförts /8-12/. Testprogrammet har bl a givit ytterligare parametervärden för elasticitetsegenskaperna.

### ***Forskningsprogram***

Metoder för att utveckla beskrivande bergmekaniska modeller för potentiella förvaringsplatser kommer att tas fram inför platsundersökningarna. Behovet av eventuella insatser när det gäller beskrivning och förståelsen av rörelser i intakt berg kommer att analyseras inom programmet för denna metodutveckling.

### **8.2.6 Termisk rörelse**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 avses med "termisk rörelse" den grundläggande termomekaniska processen volymsutvidgning vid temperaturökning. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning när det gäller den grundläggande processen. Termiska processer genererar emellertid spänningar som kan ge upphov till både reaktivering och sprickbildning. I SR 97 hanteras därför effekterna av termisk rörelse under dessa processrubriker.



### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Inga resultat som uttryckligen rör processen har rapporterats.

### **Forskningsprogram**

Metoder för att utveckla beskrivande bergmekaniska modeller för potentiella förvarsplatser kommer att tas fram. Behovet av insatser när det gäller beskrivning och förståelsen av termisk rörelse kommer att analyseras inom programmet för denna metodutveckling.

## **8.2.7 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 avses med reaktivering alla typer av rörelse i befintliga sprickor eller sprickzoner, dvs både skjuvrörelser och normalrörelser. Processen har potentiell betydelse för säkerheten på två sätt:

- A. Mekaniskt. Deponeringshålens geometri kan påverkas så att kapslar belastas till brott.
- B. Hydromekaniskt. Flödesförhållandena, och därmed bergets retentionsegenskaper, kan påverkas genom aperturförändringar hos sprickor och sprickzoner.

#### **A. Mekaniska effekter**

För basscenariot, där jordskalv per definition inte ingår, kan man genom referens till resultat från kvantitativa beräkningar, där konservativa antaganden görs om den termomekaniska lasten, dra slutsatsen att processen inte kommer att ge kapselskador. Detta förutsätter att inga deponeringshål skärs av sprickor av flera hundra meters utsträckning och att det kapselskadekriterium (10 cm skjuvning) som hittills gällt håller också framgent.

Ovanstående gäller i princip också för klimatscenariot, där jordskalv per definition inte ingick i SR 97. En osäkerhet finns dock när det gäller lasten som verkar på förvarsberget. Beroende på hur man begreppsmässigt beskriver samverkan mellan isen, jordskorpan och den viskösa manteln kan inslaget av böjspänningar variera.

För tektonikscenariot görs i SR 97 en riskanalys som baseras dels på prediktering av framtida skalvfrekvenser, dels på en metod för beräkning av de mekaniska effekterna av enskilda skalv i form av reaktivering av förvarsbergets sprickor. Slutsatsen av riskanalysen är att risken för kapselskador i tektonikscenariot är så liten att inga radionuklidtransportberäkningar är motiverade. I SR 97 betonas att riskanalysen innehåller osäkerheter, och att inte alla osäkerheter hanteras pessimistiskt. De säkerhetsmarginaler som finns inbyggda i de pessimistiskt hanterade osäkerheterna bedöms vara så stora att slutsatsen, dvs att det med dagens kunskapsläge inte är motiverat att specifikt för tektonikscenariot genomföra radionuklidtransportberäkningar, ändå håller. Följande viktiga osäkerheter framhålls:

- Prediktionen av framtida skalvfrekvenser bygger på extrapolering av statistik som gäller dagens seismiska aktivitet i den svenska berggrunden. Effekterna av en glaciationscykel, med åtföljande förhöjd seismisk aktivitet i avsmältningsskedet, är därför inte beaktad. Det uppskattade antalet och de uppskattade magnituderna av de postglaciala förkastningsrörelserna som ägde rum i norra Lappland i samband med den senaste istiden indikerar att underskattningen kan vara betydande.
- I den metod som används för att beräkna effekterna på förvarsbergets sprickor antas de dynamiska effekterna kunna representeras med en statisk last, så att spänningstillskottet motsvarar den frigjorda seismiska energin. Resultaten behöver jämföras med resultat som erhålls med oberoende, dynamiska, beräkningsmetoder.

För tektonikscenariot framför myndigheterna att extrapolationen till 100 000 år inte är relevant, eftersom den seismiska aktivitet som kan förväntas i samband med en deglaciation inte beaktats.

Myndigheterna ifrågasätter riktigheten i antagandet att framtida seismiska händelser uteslutande kommer att ske utefter befintliga sprickzoner. Möjligheten av att framtida förkastningsrörelser delvis sker längs nya linjer måste beaktas.

Myndigheterna efterfrågar en striktare definition av begreppet (seismiskt) respektavstånd, och en beskrivning av hur och när definitionen ska tillämpas.

Myndigheterna anser att det kapselskadekriterium som nu ligger bakom riskanalysen bör verifieras eller modifieras med nya beräkningar som tar hänsyn till den kapseldesign som nu gäller.

## **B. Hydromekaniska effekter**

Processen har potentiell betydelse för flödesförhållandena i berget, och därmed för förhållandena för radionuklidtransport från defekta kapslar. Denna aspekt på processen behandlas bara summariskt i SR 97. I närfältet antas inga av de framtida lasterna ge systematiska förändringar av sprickornas transmissivitet, och därför beaktas inte effekten explicit i nuklidtransportberäkningarna. Under markytan, ner till några 100 meters djup, får man däremot en systematisk vidgning av brantstående sprickor och sprickzoner under den termiska pulsen. Detta baseras på resultat från kvantitativa termomekaniska analyser. Med hänvisning till effektens ringa djup i förhållande till förvarsdjupet och till det faktum att sprickzoner och sprickor på mindre avstånd från förvaret, även brantstående, komprimeras under den termiska pulsen beaktas inte effekten i nuklidtransportberäkningarna.

I SR 97, processrapporten framhålls att effekten av sprickrörelser på flödesförhållandena, både i närfältet och på större avstånd, inte är tillräckligt systematiskt analyserade för att slutgiltigt kunna avfärdas.

Allmänt pekar myndigheterna på att resultat från kopplingseffekter inte behandlas i SR 97. Myndigheterna anser vidare att SKB bör undersöka vilka krav som kan finnas på att använda och eventuellt utveckla kopplade modeller.

Speciellt bör effekten av värmepulsen på spricksystemet i form av permanenta förändringar hos spricksystemet och därmed flödesförhållandena behandlas utförligare.

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I FUD-program 98 poängteras att förvarets inplacering i förhållande till större deformationszoner kommer att beaktas. Anledningen är att jordskalv kan leda till förskjutningar i förvaret. Myndigheterna betonar att SKB måste göra tydligt vilka kunskaper som räcker och vilka ytterligare insatser som fordras, framför allt när det gäller regionala plastiska skjuvzoner (tektoniska linser) och förutsättningarna för lokalisering i eller invid sådana zoner.

## **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

### **A. Basscenariot**

Ytterligare en termomekanisk studie har färdigställts under år 2000 /8-13/. Resultatet bekräftar att det fordras att sprickor av flera hundra meters utsträckning skär genom kapselhål för att reaktivering ska leda till kapselbrott.

### **B. Tektonikscenariot**

En studie som avser att belysa innebörden av de säkerhetsmarginaler som finns inbyggda i riskanalysen i tektonikscenariot (SR 97) har avslutats under år 2000 /8-14/. Studien visar att framför allt antagandet att förvarsbergets sprickor är friktionsfria har lett till en kraftigt överskattad risk. Också antagandet att förvarsberget är lineärelastiskt, dvs att ingen töjningsenergi går åt till sprickbildning, innebär överskattningar av risken för kapselbrott.

Bodagrottorna, i trakten av Iggesund, har undersökts med borrhning och geofysiska mätmetoder. Hypoteser har tidigare framförts att grottbildningarna skulle orsakats av seismiska rörelser i samband med den senaste glaciationen. Inga spår av uppspräckning på djupet, som skulle stödja hypotesen, har hittats. De resultat som nu kommit fram tyder på att bildningen snarare är en följd av glaciala erosionsprocesser /8-15, 8-16/.

## **Forskningsprogram**

Metoder för att utveckla beskrivande bergmekaniska modeller för potentiella förvarsplatser kommer att tas fram inför platsundersökningarna. Allmänt kommer behovet av ytterligare insatser när det gäller beskrivning och förståelsen av reaktivering att analyseras i ett tidigt stadium av programmet för denna metodutveckling. I övrigt planeras forskningsinsatser enligt nedan.

### **A. Mekaniska effekter**

Både SR 97 och granskningen visar att forskningsbehovet när det gäller de rent mekaniska aspekterna på processen reaktivering främst berör tektonikscenariot. Processen reaktivering avser både den primära rörelsen i den seismiskt aktiva zonen och sekundära rörelser, t ex i förvarsbergets spricksystem.

Tre prioriterade forskningsområden kan urskiljas:

- Prediktion av framtida skalvfrekvenser.
- Mekanismer bakom skalv, dvs om förkastningsrörelser kommer att ske utefter befintliga strukturer, eller genom någon form av ny uppspräckning.
- Effekter av skalv.

### *Prediktion av skalvfrekvenser*

De frekvens/magnitudsamband som i SR 97 antas gälla för olika regioner i Sverige, inkluderar inte effekter av en kommande glaciationscykel. Sambanden baseras på att storskaliga plattetektoniska rörelser ligger bakom dagens seismiska aktivitet. Effekter av långsam differentiell landhöjning eller av direkta lastförändringar i kombination med frigörelse av ackumulerad töjningsenergi, s k "post-glacial faulting" (PGF), är inte inkluderade. Olika insatser kommer att göras för att belysa och öka förståelsen för vilka roller och vilken omfattning landhöjningen och PGF har nu och har haft tidigare. Frekvens/magnitudsambanden baseras på regressions samband som härletts ur internationella databaser. Eventuellt behöver de använda databaserna renodlas, så att regressions samband som berör områden liknande den baltiska skölden kan härledas.

En studie av dokumenterade postglaciala förkastningar pågår och kommer att avslutas under 2001. Syftet är att sammanställa kända postglaciala förkastningar som dokumenterats i skandinavisk och kanadensisk berggrund. I studien ingår att redogöra för den eventuella kopplingen till äldre deformationszoner, kritiskt granska och sammanställa de magnitudberäkningar som tidigare utförts, samt om möjligt skatta hur parametrarna i frekvens/magnitudsambanden ska modifieras för att effekter i direkt samband med isavsmältningen inte ska försummas. En annan oberoende studie med enda syfte att uppskatta dessa parametrar avses genomföras vid Uppsala Universitet.

Det nätverk av seismografer som nu finns i linjen Gävle-Örnsköldsvik kommer att förlängas söderut till Oskarshamn. Detektionsnivån blir skalv av magnitud 0,5. Kring Oskarshamn och Norduppland förtätas nätet så att också skalv med magnituder nedåt -0,5 kan detekteras. Syftet är att allmänt öka förståelsen för storskaliga rörelser i skölden med fokus på de områden där platsundersökningar ska göras.

Ett nätverk av seismografer planeras att installeras i området kring Lansjärv i norra Lappland. Syftet är att undersöka vilken typ av rörelse som nu förekommer i zoner där tidigare stora postglaciala förkastningar beräknats ha ägt rum, och att öka förståelsen för dessa rörelser.

### *Mekanismer bakom skalv*

En studie av metoder för datering av sprick- och sprickzonsmaterial har påbörjats och kommer att avslutas under år 2001 /8-17/. Syftet är att öka förståelsen av sprickzoners deformationshistoria för att om möjligt kunna bedöma om delar av potentiellt aktiva sprickzoner kan ha nybildats, t ex i samband med den senaste glaciationen, eller om postglaciala förkastningsrörelser i allmänhet är renodlade reaktiveringsepisoder.

### *Effekter av skalv*

Ett program för att beräkna deformationer hos förvarsbergets sprickor med hjälp av dynamiska numeriska modeller har påbörjats med en pilotstudie. Målsättningen är att ta fram samband mellan avstånd till skalvet, skalvets magnitud och maximal skjuvdeformation hos given spricka i förvaret, för att därmed kunna fastställa seismiska respektavstånd till potentiella skalvzoner. Programmet har två huvudkomponenter:

- att härleda randvillkor som svarar mot skalv av given magnitud som sker på givet avstånd och
- att ansätta randvillkoren på lämpligt utformade modeller.

Standardmetoder och koder, t ex WAVE, finns för att numeriskt generera syntetiska skalv av olika magnitud och karaktär. Flera etablerade koder, t ex UDEC, FLAC3D, 3DEC, kan komma ifråga för analys av effekterna i förvarsberget. I den nu avslutade pilotstudien användes WAVE för att bestämma randvillkor och FLAC3D för att analysera effekterna. Efter utvärdering av pilotstudien avses tillämpningen utvecklas under de kommande åren.

Ett program för att sammanställa information om dokumenterad inverkan av skalv på undermarksanläggningar har initierats. Syftet är att erhålla empiriska aspekter på begreppet respektavstånd. Resultatet kommer att integreras med de numeriska analyser som initierats och planerats.

En sammanställning av jordskalvens effekter på undermarkskonstruktioner pågår. Projektet sker i nära kontakt med SKB:s internationella systerorganisationer.

## **B. Hydromekaniska effekter**

Ett allmänt program för granskning och utvärdering av resultat som genererats inom området bergmekanisk modellering under det sista årtiondet kommer att genomföras. Syftet är också att identifiera kunskapsluckor. Programmet avser inte bara reaktiveringsprocessen, utan alla bergmekaniska problemställningar som kan ha betydelse för djupförvarets konstruktion och långsiktiga säkerhet. En inledande fas, bestående av en omfattande inventering av publicerade arbeten inom området, är klar. Inom detta program kommer också frågor som har att göra med hydromekaniska effekter att beaktas. Under de närmaste åren måste man dessutom initiera program för att klarlägga vilka mekaniskt (eller termomekaniskt) inducerade förändringar av närfältsbergets och fjärrområdets permeabilitet som kan tillåtas från säkerhetsanalyssynpunkt. Inom ramen för det internationella projektet DECOVALEX III pågår arbete med att kartlägga behovet av att genomföra kopplade analyser. SKB kommer också fortsättningsvis att delta i detta arbete.

### **8.2.8 Sprickbildning**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 avses med "sprickbildning" både nybildning av sprickor och propagering av befintliga sprickor. Två potentiella effekter på säkerheten identifieras: direkt mekanisk påverkan på kapslar, och effekter i form av förändrade flödesförhållanden.

Allmänt framhåller SKB i SR 97 att förståelsen för hur processen ska hanteras beräkningsmässigt är bristfällig. Utvecklade teoretiska modeller för sprickbildning och sprickpropagering finns, men ingen bra kunskap om hur man på ett ändamålsenligt sätt kan omsätta dessa till användbara beräkningsmodeller. Däremot finns erfarenhetsbaserade hållfasthetskriterier.

Slutsatsen i SR 97 är att vad gäller förändringar av deponeringshålsgeometrin och därmed risken för mekaniska skador på kapseln har processen liten betydelse jämfört med reaktiveringsprocessen. De områden kring kapselhålen som är nära brotttillstånd, eller som kan råka i brotttillstånd på grund av framtida laster är små. Dessa slutsatser baseras på tillämpning av erfarenhetsbaserade brottkriterier, och på ungefärliga angivelser av typiska värden på hållfasthetsparametrar. Detta gäller basscenariot och klimatscenariot. I tektonikscenariot är processens betydelse inte utredd, men antas också där vara mindre viktig än reaktiveringsprocessen.

Den hydromekaniska aspekten, dvs permeabilitetsförändringar på grund av uppsprickning hanteras inte i SR 97.

Myndigheterna anser att omfattningen av den testning av bergprover som gjorts för att bestämma hållfasthets- och deformationsegenskaper är för liten. Myndigheterna ger i övrigt inga synpunkter på behandlingen av processen som sådan.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Processen kommenteras inte uttryckligen i dessa dokument.

### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Ett testprogram för bestämning av mekaniska egenskaper hos den i Äspö HRL vanligt förekommande dioriten har genomförts /8-18/. Testprogrammet ger parametrar för två olika hållfasthetskriterier: Mohr-Coulomb och Hoek-Brown.

### **Forskningsprogram**

Metoder för att utveckla beskrivande bergmekaniska modeller för potentiella förvarsplatser kommer att tas fram inför platsundersökningarna. Allmänt kommer behovet av ytterligare insatser när det gäller beskrivning och förståelsen av sprickbildningsprocessen att analyseras inom programmet för denna metodutveckling. I övrigt planeras forskningsinsatser enligt nedan.

Utvecklingsarbete pågår inom projektet Review and Development of Fracture Initiation Criteria. Målsättningen är att formulera sprickpropageringskriterier som kan implementeras i kod för simulering av spröda uppsprickningsförlopp i ansträngda partier kring förvarets hålrum.

Ett forskningsprogram med syfte att undersöka återfyllningens/buffertens roll för att begränsa uppkomst och utveckling av progressiva spröda brott i tunnelväggar och deponeringshållsväggar har formulerats. Programmet får formen av ett doktorsarbete vid University of Alberta, Kanada.

## **8.2.9 Tidsberoende deformationer**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 avses med tidsberoende deformationer både deformationer som uppstår på grund av långsamma kontinuerliga lastförändringar (betingade av storskaliga tektoniska rörelser) och deformationer (krypörelser) som beror på bergmassans inneboende tidsberoende deformationsegenskaper.

Effekten av lastförändringar gränssätts i SR 97 genom att använda uppskattningar av tektoniskt betingade genomsnittliga töjningshastigheter i den Baltiska Skölden och om-sätta dessa till spänningstillväxt. Inga effekter av att delar av töjningen absorberas i deformationszoner tillgodoräknas. Ansatsen bedöms därför generellt som konservativ. Slutsatsen är att spänningstillväxten inte ger deformationer som kan skada kapseln. En osäkerhet finns dock när det gäller fördelningen av töjningarna, eftersom man inte kan utesluta att det finns regioner med större töjningshastighet än genomsnittet.

Den konceptuella förståelsen av kryprörelser i berg är dålig, vilket innebär att effekterna inte kan kvantifieras eller beskrivas i detalj. Effekterna av kryprörelser gränssätts därför överslagsmässigt i SR 97. Om berget uppträder som en trög vätska kan kapselhålen komprimeras tills bentonitens svälltryck svarar mot medeltryckspänningen i berget. Om kryprörelsen istället lokaliseras till befintliga sprickor kan rörelsen pågå tills alla skjuvspänningar i alla sprickor försvunnit. Slutsatsen är att kapseln kan skadas om deponeringshålet skärs av sprickor med flera hundra meters utsträckning.

Processen kommenteras inte uttryckligen i granskningen.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Processen behandlas inte uttryckligen i dessa dokument.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Inga resultat som uttryckligen rör processen har rapporterats.

### ***Forskningsprogram***

Ett program som syftar till att beräkningsmässigt gränssätta effekterna av krypbetingad konvergens av deponeringstunnlar kommer att genomföras. Syftet är framför allt att klarlägga vilket inflytande återfyllningens mekaniska egenskaper kommer att ha på konvergens. Programmet kommer eventuellt att leda till mer fundamentala analyser av kryprörelser i sprickor. Tidsberoende deformationer i det intakta, solida, berget kommer även fortsättningsvis att betraktas som försumbara i jämförelse med de deformationer som sker i befintliga sprickor.

## **8.2.10 Erosion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 bedömdes processen erosion inte vara av betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet.

Myndigheterna konstaterar att flera potentiellt ogynnsamma FEP på mer eller mindre goda grunder har undantagits från riskanalysen i SR 97, bl a med motiveringen att de är osannolika. Som exempel anges långsiktig erosion av geosfären.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Processen behandlas inte uttryckligen i dessa dokument.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Erosion av kristallint berg har i de flesta kustnära områden varit liten, medan exempelvis Sydsvenska Högländet bär spår av mer omfattande erosion.

## **Forskningsprogram**

SKB har gjort bedömningen att långsiktig erosion av geosfären har underordnad betydelse för långsiktig funktion och säkerhet. Det föreligger dock osäkerheter avseende hur djupt erosionen kan ske i deformationszoner. SKB har därför för avsikt att initiera en utredning med syfte att ge klarhet i denna frågeställning.

### **8.2.11 Advektion/blandning**

I avsnittet om radionuklidtransport behandlas advektion och dispersion i transportvägar. I detta avsnitt behandlas den blandning som uppstår genom att vattnet rör sig med varierande hastighet i bergets spricksystem och hur processen påverkar grundvattenkemin.

#### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 användes grundvattenkemidata från tre olika platser. Dessa utvärderades och jämfördes med varandra utifrån förutsättningen att vattnet i berggrunden blandas till följd av den advektiva transporten och att detta är den huvudsakliga förklaringen till att vattenkemin varierar inom och mellan platserna. Med kunskap om vilka hydrogeologiska förhållanden som nu råder och som tidigare rått gjordes en modell för den grundvattenkemiska utvecklingen på de tre platserna. Trots att mängden och kvaliteten på data varierade från plats till plats var det möjligt att med denna modell ge en rimlig prognos för hur grundvattens kemi kan utvecklas i framtiden på samtliga tre platser.

Blandning förekommer parallellt med reaktioner. Det finns därför en svårighet i att diskutera blandning som ett enskilt fenomen, men med den metodik som användes i SR 97 kan svårigheterna överbryggas /8-19/.

#### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

”SKI bedömer att SKB gjort betydande framsteg inom programmet för grundvattenkemi med hjälp av erfarenheterna från Äspölaboratoriet. SKI välkomnar fortsatta satsningar för att förfinas M3-metoden och anser att SKB besitter ett mycket användbart verktyg för framtida platsundersökningar. SKI vill dock påpeka att metoden bara delvis täcker in de processer som förväntas vara betydelsefulla i slutförvarssammanhanget samt att alla tolkningsmodeller är avhängiga kvaliteten på de data som de grundas på. SKI ifrågasätter SKB:s slutsats att kunskapen om olika vattentypers ursprung och utveckling framtagna vid forskningen vid Äspö är direkt användbar vid varje annan tänkbar platsutvärdering.”

#### **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Blandningsberäkningar som ursprungligen genomförts med data från Äspöområdet har kompletterats med beräkningar där data från andra undersökta platser i Sverige och Finland inkluderas. Det visar sig att blandningsmönstret är liknande, men proportionerna av de olika ”typvattnen” varierar från plats till plats /8-20/. 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.



Försök har gjorts att förutom de kemiska parametrarna även inkludera hydrologiska data i beräkningarna av blandningsproportioner, tills vidare utan positivt resultat. Resultat från modelleringsövningen Task 5 inom Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes har visat att det är möjligt att numeriskt hantera processen advektion/blandning i stor skala och därvid utnyttja såväl hydrologiska som kemiska data.

### ***Forskningsprogram***

I kommande platsundersökningar blir platsspecifika blandningsberäkningar ett av de viktigare verktygen för att förstå vattnets utveckling på platsen. Det är möjligt men kanske inte troligt att blandningsberäkningar kommer att visa förekomst av olika vattentyper på de olika platserna.

Se även avsnitt 8.2.21.

### **8.2.12 Diffusion**

Molekylär diffusion och matrisindiffusion, samt dess betydelse för nuklidtransport behandlas i avsnittet om radionuklidtransport. I detta avsnitt hanteras effekter av molekylär diffusion globalt i ett mycket långt tidsperspektiv samt hur processen påverkar de hydrokemiska förhållandena.

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Beräkningar som presenterades i FUD-program 98 visar att den salthaltsprofil som uppmätts i borrhålet KLX 02 i stort överensstämmer med en diffusiv transport som pågått i storleksordningen en miljon år. Mätningar av uppehållstiden för samma vatten ger 1,5 miljoner år /8-21/.

SKI anser att SKB måste tydligare motivera sina slutsatser att närvaron av så kallad brines är en tydlig indikator på att stagnanta förhållanden råder.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Platsundersökningar i Finland har visat på mycket likartade grundvattenkemiska förhållanden i Olkiluoto och i Äspö. I det övre partiet ner till cirka 500 meters djup förekommer meteoriskt vatten, gammalt havsvatten och glacialt vatten i varierande proportioner. Salthalten ökar linjärt mot djupet. På större djup än 500 meter tilltar salthaltsökningen och vattnet bedöms ha en uppehållstid som vida överstiger tiotusen år /8-22/. Detta tyder på att det ner till 500 meters djup pågår en dynamisk process styrd av inflöde av vatten uppifrån i höglänta områden och utflöde i lägre liggande områden. På större djup är grundvattensystemet opåverkat av denna dynamik. Det faktum att det till synes finns en tydlig gräns mellan det dynamiska och det djupare partiet tolkas så att det under en lång tid funnits ett vattenparti som utvecklats till en högre salthalt än det överliggande vattnet. I och med att salthalten ständigt ökat, genom att salt går i lösning ur bergmatrisen, har det stagnanta vattnet blivit än mer obenäget att röra sig. Det är inte möjligt att påstå att vattnet är helt stillastående, men i jämförelse med det överliggande

dynamiska vattnet är rörligheten väsentligt lägre, förmodligen i proportion till den uppmätta uppehållstiden. Om det dynamiska vattnet har en uppmätt uppehållstid av 1 000 till 10 000 år så är motsvarande värde för det stagnanta vattnet en miljon till tio miljoner år /8-21/. Därmed kan man grovt anta att även flödet är en faktor 1000 lägre vid i övrigt likartade hydrologiska förhållanden. Slutsatsen av detta är att vattnet, som är rörligt i ett geologiskt tidsperspektiv, kan anses stagnant i ett 10 000–100 000 års perspektiv.

### ***Forskningsprogram***

Numerisk modellering för att exemplifiera förekomsten av brines under olika randförhållanden planeras. Den viktigaste frågan att besvara är: Vad krävs för att en brine ska bildas och vad krävs för att den ska bli bestående? Kopplade frågor gäller hur man kan identifiera ett stagnant eller långsamt rörligt vatten.

### **8.2.13 Reaktionen grundvatten/bergmatris**

På lång sikt bestäms grundvattnets kemi av reaktioner med bergets primära mineral. Dessa vittrar och avger ämnen i löst form i grundvattnet.

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Myndigheterna ansåg att ”för att kunna redovisa t ex buffererosion och kolloidbildning kvantitativt krävs att SKB tar fram en mer detaljerad modell av hur grundvattenkemin kan utvecklas på lång sikt.”

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI finner det angeläget att SKB fortsätter att satsa resurser på modeller och experiment för att studera kemiska processer i djupa grundvatten. Dessa bör kunna visa integrerade effekter av processer som kontrolleras av t ex kinetik, mikrobiell katalys och kemisk jämvikt.

Det väsentliga är att ta fram underlag för att kunna bedöma hur de kemiska förhållandena kan påverkas av de förändringar och störningar som kan inträffa (förändrat klimat, förändrat grundvattenflöde, förvarets påverkan på grundvattenkemin med mera). SKB nämner ett antal geokemiska jämviktsprogram som vart och ett är försedda med en tillhörande termodynamisk databas. SKI anser att en högre grad av konsekvens skulle kunna uppnås om SKB endast använder sig av en utvald och granskad databas som kan anpassas till samtliga koder.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Grundvattnets sammansättning i sprickor, ett relativt välstuderat område, är ofta påverkat av både blandning och reaktioner. Matrisvattnets sammansättning däremot, förväntas bero främst av reaktioner mellan bergmineral och grundvatten. Vid Äspölaboratoriet pågår ett experiment med syfte att studera matrisvattnets sammansättning.

Experimentets huvudmål är att:

- Bestämma matrisvattnens ursprung och ålder.
- Fastställa huruvida pågående eller tidigare diffusionsprocesser påverkat matrisvattnens sammansättning antingen genom utspädning eller ökad koncentration.
- Erhålla ett urval av grundvattensammansättningar som lämpliga indata till närområdesmodellberäkningar.
- Fastställa tunna sprickors och mikrosprickors inverkan på matrisvattnens kemi i berggrunden.

Experimentet har utformats för att provta matrisvatten från förutbestämda isolerade borrhålssektioner. Borrhålets placering valdes på basis av bl a bergart, mineral och geokemisk homogenitet, djup, samt förekomst och frånvaro av sprickor. För att provta matrisvatten har specialutrustning konstruerats.

Från hösten 1999 till våren 2001 har ett omfattande undersökningsprogram pågått och aktiviteter som genomförts har berört mineralogiska studier, porositetmätningar, kross/urlakningsexperiment, permeabilitetstester på Äspödiorit, studier av vätskeinnestlutningar samt provtagning av matrisvatten. Dessutom har grundvatten- och hydrauliska data från TRUE-, Prototyp-, Chemlab- och Microbeexperiment som representerar berggrundsmiljön i närheten av borrhålet för matrisexperimentet sammanställts och tolkats.

Kross/urlakningsexperiment och studier av vätskeinnestlutningar tyder på att det finns en stark saltkälla i berget men den tycks huvudsakligen förekomma i form av vätskeinnestlutningar. Ett försök pågår att provta det verkliga matrisvattnet (dvs obundet vatten mellan mineralkornen) genom att i laboratorium använda en högtrycksutrustning för att pressa ut obundet matrisvatten.

Det provtagna vattnet från borrhålssektionen i Äspödioriten har en genomsnittlig salthalt som återspeglar jonkaraktern för grundvattensammansättningar i närbelägna sprickor (med undantag av  $\text{SO}_4^{2-}$  och  $\text{Mg}^{2+}$ ). Skillnaden är klor- och strontiumisotopsignaturer samt högre innehåll av flertalet spårelement. Omgivande grundvatten indikerar att de mer transmissiva sprickorna är påverkade av ett inflöde av en nutida grundvattenkomponent, såsom Östersjön och meteoriskt nederbördsvatten, som hänger samman med den hydrauliska avsänkning som orsakats av tunnelbygget, på bekostnad av äldre saltvatten och glacialt smältvatten som späts ut eller förts undan.

Å andra sidan återspeglar matrisprovet grundvatten som har trängt ner i berggrunden före tunnelbygget och således bibehållit mindre utspädda signaturer av både glacialt och äldre salt vatten. En tolkning av resultaten är att s k matrisvatten utgör en mycket liten del av det vatten som samlats upp i borrhålet och att merparten kommer ifrån sprickor och mikrosprickor som har förbindelse med större strukturer. Det finns därmed för närvarande ingen anledning att misstänka att ett mycket salt vatten ska tränga in i deponeringshålen.

### **Forskningsprogram**

Ett doktorandprojekt har nyligen startats för att studera långtidseffekter på grundvattenkemin i djupförvaret. Arbetet fokuserar på redoxreaktioner mellan grundvatten och bentonitlera eftersom sådana reaktioner anses kunna ha en reell möjlighet att påverka den naturliga vattenkemin. Andra vittringsreaktioner mellan bergartsmineral och grundvatten kommer att ingå i den mån de också kan anses ha betydelse.

Kemiska effekter efter förslutning av förvaret fram till det att ursprungliga förhållanden återinträtt kommer att utredas som ett eget projekt med start i det skede då information från de utvalda kandidatplatserna finns framme. Dessa data ger tillsammans med konstruktionshandlingen det nödvändiga underlaget för överslagsberäkningar.

Se även avsnitt 8.2.21.

#### **8.2.14 Lösning/fällning sprickmineraler**

Upplösning och utfällning av sprickmaterial är en ständigt pågående process. Även om den största andelen bildats under hydrotermala förhållanden kan man utnyttja lågtemperaturmineral för att förstå grundvattenkemins utveckling

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I Processrapporten konstateras att det råder en osäkerhet om vissa järnoxiders ursprung och där det har betydelse om de uppstått under hydrotermala förhållanden eller genom oxidation av syresatt grundvatten.

Myndigheterna ansåg att ”i tid och rum begränsad förekomst av syre på förvarsnivå är mindre sannolik men kan inte uteslutas vare sig genom de modellstudier, laboratorie-försök eller geokemiska undersökningar som hittills presenterats”.

Den internationella granskningsgruppen sade följande: ”Ett viktigt krav för den långsiktiga integriteten för EBS inom KBS-3-metoden är återställande och bevarande av en reducerande grundvattenmiljö kring slutförvarstunnlarna. Därför krävs en tydlig identifiering och utvärdering av alla händelser, förhållanden och processer som skulle kunna hota det reducerande tillståndet kring slutförvaret eller dess buffertkapacitet. IRT (granskningsgruppen) har identifierat den möjliga närvaron och inverkan av syresatt glacialt smältvatten som penetrerar ner till förvarsdjup, som ett möjligt hot, vilket kräver större uppmärksamhet. Diskussioner visar att SKB lutar på att reducerande förhållanden råder på djupet, utgående från en serie argument, men dessa uttrycks inte till fullo i SR 97.”

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI ansåg att ”det är väsentligt att ta fram underlag för att kunna bedöma hur de kemiska förhållandena kan påverkas av de förändringar och störningar som kan inträffa.”

#### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Oxiderande förhållanden på förvarsdjup kan huvudsakligen delas upp i två delproblem:

- Förvaret kommer att vara syresatt under byggnad och drift. En del syre kommer alltså sannolikt att bli kvar i förvaret och dess närhet till förslutning.
- 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 /8-23/.

För att kunna utvärdera risken att glacialt smältvatten når förvarsdjup gjordes en genomgång av befintliga data både från Äspö/Klipperås (förekomst av redoxkänsliga mineral etc) och i vidare bemärkelse /8-24/. Data användes också för att modellera migrationen av en redoxfront /8-25/.

Både utvärderingar av vattenkemi /8-19/ och sprickmineralogi /8-26/ visar att det finns klara indikationer på att komponenter av ett glacialt smältvatten har nått till stora djup (>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 /8-26, 8-27/. Det är därför mycket olyckligt att automatiskt knyta förekomsten av glacialt smältvatten till oxiderande förhållanden.

Vikten av att kunna belägga reducerande förhållanden bakåt i tiden (för att kunna modellera framåt) har understrukt betydelsen av att noggrant kartera redoxkänsliga sprickmineral inför kommande platsundersökningar.

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 i tunneln, deponeringshålen eller längs de vattenförande sprickorna. REX-projektet bestod av:

- Fältstudier av mikrobiellt upptag av syre på flera platser längs Äspötunneln.
- In situ-injektering av syre och uppföljning av syreupptaget vid en isolerad sprickyta i Äspötunneln.
- Ett laboratorieförsök med den andra halvan av sprickytan som användes vid in situ-experimentet (s k replicaförsök).
- Laboratorieexperiment med grundvatten, bakterie- och mineralprov från Äspö i syfte att stödja tolkningen av fält- och replicaförsöken.

Resultaten från in situ-försöket bekräftades av replicaexperiment i laboratorium. Båda undersökningarna visade att syre hade konsumerats helt efter några dagar. Överensstämmelsen var påfallande god med tanke på olikheter i experimentella förhållanden. Till exempel förekom olika mikrobiella processer i de två experimenten.

Laboratorieförsök med bergfragment visade att mikrobiell aktivitet orsakade en ökad bildning av lermineral. Hastigheten för syreupptag på sprickfyllnadsmaterial (huvudsakligen hydrotermalt omvandlad Äspödiorit med klorit, kalcit och lermineral) bestämdes under laboratorieförhållanden. Dessa hastigheter var högre än de som rapporterats för rena mineralsystem, och bekräftade det snabba syreupptag som uppmättes i såväl fält- som replicaexperiment.

Projektet är avslutat och rapporterat /8-28/. De huvudsakliga slutsatserna är:

- 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 8.2.15.

EQUIP är ett projekt där Storbritannien, Frankrike, Spanien, Finland och Sverige deltagit. Projektet syftar till att utnyttja sprickmineral som indikatorer på nuvarande och tidigare grundvattenkemi. Olika metoder har applicerats på flera typer av sprickmineral från en plats i varje land. Metodernas generella användbarhet har därefter utvärderats.

Rent allmänt framstår kalcit som den mest användbara mineralen 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.

Många "laser ablation"-baserade mikroanalytiska tekniker (analys av en punkt i storlek 10–20  $\mu\text{m}$  med avseende på elementsammansättning eller isotopsammansättning) visar mycket lovande resultat. Å andra sidan är det viktigt att kombinera mikroanalyserna med en helhetsbild där noggrann kärnkartering, texturella studier baserade på mikroskopering av tunnslip, samt övergripande kemisk och isotopgeologisk information från bulkanalyser utgör stommen.

Arbetet är avrapporterat i /8-26/. En fortsättning under namnet PADAMONT är planerad 2001–2004.

### **Forskningsprogram**

Resultaten från REX-experimentet kommer att utnyttjas vid optimering av förvaret och vid förvarsutformningen. Nya beräkningar planeras vad gäller hur djupt ett glacialvatten kan tränga och hur djupt syresatt glacialvatten kan nå innan syret förbrukats, se vidare under hydrologiska processer. Därutöver bedöms området idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

I nuklidtransportmodeller betraktas retention som en reversibel process och beskrivs med en fördelningsfaktor,  $K_d$ . Detta synsätt kan ur säkerhetsanalytisk synvinkel vara konservativt, eftersom det underskattar retentionen. Däremot kan processer som medfällning och annan fastsättning inte beskrivas på ett acceptabelt sätt.

Idag finns analytisk-kemiska metoder som kan användas för att studera sådana processer och därigenom ge data för kvantitativa beräkningar. Därför kommer forskningsinsatser att läggas på sådana undersökningar under den kommande sexårsperioden. Om resultaten visar sig vara användbara kommer medfällningsreaktionen i kalcit och eventuellt järnhydroxid att kunna inkluderas i nuklidtransportmodeller framöver.

## 8.2.15 Mikrobiella processer

Mikrober påverkar grundvattnets kemi genom att de påskyndar reaktioner som annars sker mycket långsamt. Främst påverkas redoxreaktioner, men även vittringsreaktioner kan katalyseras.

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

SR 97: ”Järnhydroxid och mikrobutfällningar som bildas då reducerande grundvatten sipprar ut och möter luftsyre i tunnlar ger stora mängder organiskt material. Vid förslutning av förvaret kan det organiska kolet tillgodogöras av andra mikrober, t ex för att reducera kvarblivet syre.”

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Följande noteras från granskningen av FUD-program 98:

”Modeller och experiment bör kunna visa integrerade effekter av t ex kinetik, mikrobiell katalys och kemisk jämvikt.”

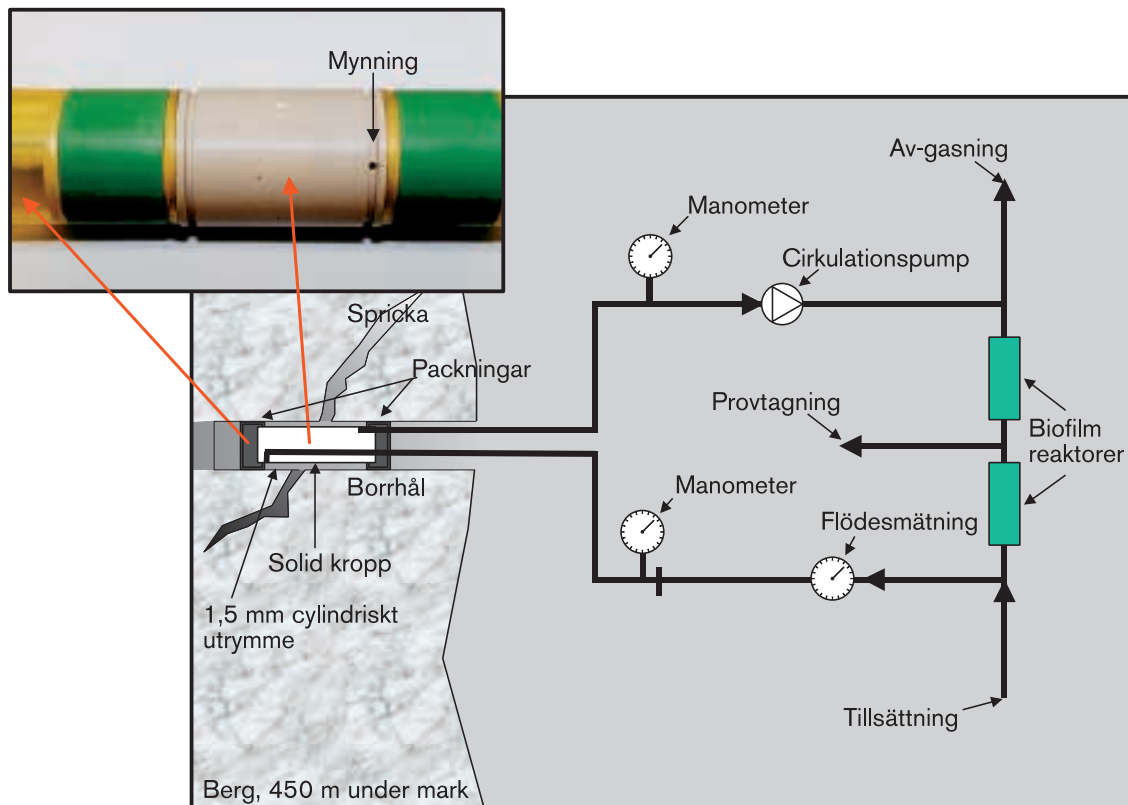
”SKI anser att SKB genom sin satsning på mikrobiologi bidragit till att den grundvetenskapliga förståelsen för mikroorganismer i djupa grundvatten förbättrats avsevärt, vilket också ger en god grund för att kunna förutsäga effekterna på ett slutförvars långsiktiga säkerhet. I en förlängning förväntas en tydligare integrering av mikrostudier med främst geokemi men även säkerhetsanalys och platskaraktisering.”

### **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Under nittioalet har forskning i Äspölaboratoriet och annorstädes visat att olika typer av mikrober lever i urbergets sprickor. Vissa lever av organiska kolföreningar från jordytan medan andra kan leva av metan och vätgas från jordens mantel.

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 /8-29/. När syre inte finns som oxidationsmedel kan olika mikrober istället utnyttja andra föreningar, t ex svavlet i sulfatjoner ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) under bildning av sulfid ( $\text{S}^{2-}$ ), järnet i olika mineral ( $\text{Fe}^{3+}$ ) som då löses ut till grundvattnet i form av ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Även mangan ( $\text{Mn}^{4+}$ ) i brunsten kan användas av mikrober och löses då ut till grundvattnet ( $\text{Mn}^{2+}$ ). 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 /8-30/.

Ett specialinrett utrymme på 420 meters djup i Äspölaboratoriet möjliggör fortsatta arbeten kring mikrober och deras betydelse i djupförvaret, i ett projekt benämnt MICROBE, se figur 8-1 /8-31/. MICROBE-utrymmet har instrumenterats och grundvattnets kemi och mikrobiologi har karakteriserats och rapporterats /8-32/. Grundvattensammansättningen och mikrobiellinnehållet är relativt typiskt för grundvatten på detta djup.



**Figur 8-1.** Utformning av experimentuppsättning på MICROBE. Vattenförande sprickor sammankopplas med separata cirkulationssystem i containern utanför borrhålen. Grundvatten kan cirkuleras eller provtas från systemet. I biofilmreaktorer blir det möjligt att undersöka hur mikrober på sprickytor kan påverka radionuklidtransporten. Inne i borrhålet finns en solid kropp som tillsammans med rörens tunna diameter, cirka 2 mm, gör att dödvolymer i systemet blir mycket liten.

### **Forskningsprogram**

Forskningsinsatserna har hittills i stor utsträckning fokuserats på processer som kan relateras till den ytnära hydrologiska omsättningen av grundvatten som infiltrerar uppe på markytan och omsätts i berggrunden ner till djup som beror av både historiska och nu rådande förhållanden.

Fortsatta insatser kommer dessutom att omfatta "djup mikrobiologi" och processer som pågår utan att påverkas av den ytnära vattenomsättningen. I MICROBE på 420 meters djup i Äspölaboratoriet ska mikrobernas inverkan på bergets redoxstabilitet studeras. MICROBE ska också tjäna som en mycket väl karakteriserad provplats för experiment där förvarsliga förhållanden krävs. Ett viktigt sådant forskningsområde rör migration, överlevnad och aktivitet av sulfidbildande bakterier (sulfatreducerande bakterier) i buffertmaterial eftersom sulfid är korrosivt för kopparkapslarna. Mikrobernas inverkan på radionuklidtransport kräver också ett experimentområde med förvarsliga förhållanden, när konstanter, processer och modeller framtagna i laboratoriet behöver testas under realistiska förhållanden.



### **8.2.16 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial**

Processen har betydelse i ett initialt skede då förhållandena påverkas av utbyggnaden av förvaret.

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Myndigheterna säger följande i sin granskning: "Hur stora mängder organiskt material som kan lämnas kvar vid förslutning, eller större mängder cement i direkt anslutning till deponeringshålen beskrivs inte i SR 97".

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

I samarbete med bl a Posiva planeras ett projekt med syfte att klargöra effekter av betong i deponeringshålen och tunnlarna för att avgöra vilka typer och mängder av betong som kan användas.

Övriga oorganiska konstruktionsmaterial är huvudsakligen stål. Detta område bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration.

För organiskt material, se avsnitt 8.2.15.

### **8.2.17 Kolloidomsättning**

Kolloider är små partiklar som inte sedimenteras. De kan således följa med grundvattnet och även fungera som bärare av radionuklider.

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Av Processrapporten framgår följande: "Bildning av kolloider är beroende av flera faktorer och är idag inte fullständigt kända. I motsats till ämnen som finns lösta i vattnet går det inte att ansätta jämviktsvillkor för kolloider."

Myndigheternas granskningsrapport: "Marginalerna är små för att inte buffererosion och kolloidbildning ska förekomma. För att belysa sådana fenomen krävs sannolikt att SKB tar fram en mer detaljerad modell av hur grundvattenkemin kan utvecklas på lång sikt."

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

## **Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

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 anses vara lågt /8-33/. Halten begränsas av att kolloiderna fäster på sprickytorna vilket minskar deras stabilitet och transportkapacitet.

I Nevada, där hundratals underjordiska atombombstester har utförts, visar mätningar av plutonium att kolloidfraktioner i grundvattnet kunnat spåras 1,3 km från detonationsplatsen /8-34/. Man har därför en indikation på en snabb kolloidtransport.

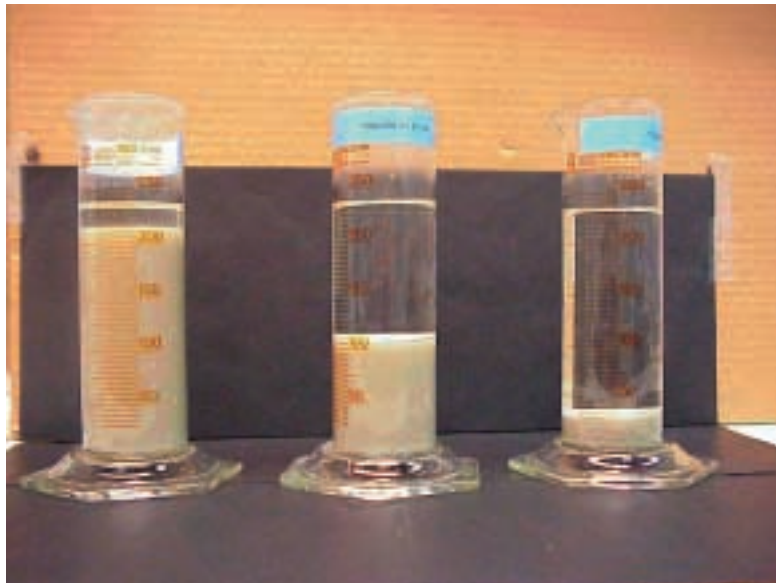
## **Forskningsprogram**

Ett projekt, med namnet Colloid initierades hösten 2000 och beräknas vara avslutat i december 2003. Projektet syftar till att klarlägga kolloiders stabilitet, deras potential att transportera nuklider samt bentonitens potential att generera kolloider. Resultaten kommer att användas vid säkerhetsanalyser för kolloidtransportmodellering.

Bentonitlerans roll som kolloidkälla undersöks vid varierande grundvattensalhalter (NaCl/CaCl) i laboratorieförsök, se figur 8-2. Resultaten av dessa mätningar är avgörande för hur kolloidtransport studeras.

Bakgrundskolloidhalten i olika vattentyper och sprickzoner längs Äspötunneln kommer att mätas med en högupplösande laserutrustning.

Det har även diskuterats att studera transport av kolloider mellan två närbelägna borrhål vid Äspölaboratoriet. Borrhålen penetrerar samma sprickzon, den så kallade TRUE feature A, som har en relativt homogen geologi.



**Figur 8-2.** Saltbalten i vattnet kan påverka kolloidhalten. Försöket visar olika sedimenteringsgrader av bentonit löst i vatten vid olika jonstyrka (NaCl) för vattnet. En hög eller låg jonstyrka kan resultera i instabilitet och kolloibildning.

## **8.2.18 Gasbildning/gaslösning**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Gaser som förekommer lösta i grundvattnet är av varierande sammansättning. Huvudkomponenterna är ofta N<sub>2</sub>, Ar, He, H<sub>2</sub> och CH<sub>4</sub>. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Det kan nu anses klarlagt att gasen har flera olika ursprung. En del kommer från manteln, en del med vatten från markytan och andra delar bildas biogent eller radiogent i berget. Andelen av de olika typerna varierar regionalt, med bergart och med djupet /8-35/. Se även avsnitt 8.2.4.

Vatteninflödet till öppna borrhål och tunnlar är lägre än förväntat. En förklaring till detta som diskuterats är tvåfasflöde. Kunskap om hur tvåfasflöde uppkommer och yttrar sig i närheten av borrhål och tunnlar är nödvändiga för att kunna tolka de observationer av hydrauliska förhållanden som görs i borrhålen och tunnarna. Vidare behövs denna kunskap för tolkning av hur buffertmaterial och fyllnadsmassor uppför sig, speciellt under driftskedet och under förslutningen. Den generella slutsatsen som SKB drar från resultat från laboratorieexperiment och borrhålsförsök i Stripa och Äspölaboratoriet är att avgasning av grundvatten inte kommer att orsaka betydande flödesreduktioner i öppna borrhål under förhållanden som är normala för svensk granitberggrund /8-10/.

### ***Forskningsprogram***

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **8.2.19 Metanisomsättning**

Vid låg temperatur och högt tryck bildar vatten och metangas en fast fas som kallas metanis. Metanis kan bildas under en permafrost.

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Metanisbildning hanterades inte i SR 97. Osäkerheterna kring dess bildning, framför allt om hur djupt en permafrost kan nå och på vilket sätt metan kan ansamlas under permafrosten, gör det omöjligt att med dagens kunskap beräkna effekterna.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Klimatförändringar och deras effekter på ett djupförvar analyserades i SR 97. Fokus i den analysen var på förhållanden som förorsakas av att en inlandsis med en tjocklek på upp till tre kilometer bildas och försvinner i flera omgångar under en glaciationscykel. Övriga klimatförhållanden analyserades i mindre omfattning eftersom påverkan på förvarsberget blir mindre dramatiska men också på grund av brist på kunskap, t ex om permafrostförhållanden. Nu vet man att en förhållandevis stor del av den senaste glaciationscykeln varit isfri och kan ha förorsakat en mer omfattande permafrost än man tidigare trott.

### ***Forskningsprogram***

I samarbete med bl a Posiva planeras ett projekt som syftar till att klargöra de hydrogeologiska och hydrokemiska förhållandena vid permafrost. Projektförslaget omfattar studier av en plats där permafrost förekommer och som därmed kan anses vara analog för motsvarande situation i ett framtida djupförvar. En av frågorna rör bildning och förekomst av metanis.

### **8.2.20 Saltutfrysning**

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

Då saltvatten fryser långsamt tvingas lösta ämnen (salter) ut i lösning. Processen har betydelse i samband med permafrost. Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inte behandlat.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Eftersom saltutfrysningen beror av permafrost kan man förvänta sig att effekten under en mer omfattande permafrost också ger mer omfattande saltutfrysning.

### ***Forskningsprogram***

Ingår som en av frågeställningarna i permafrostprojektet, se avsnitt 8.2.19 ovan.

### **8.2.21 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling**

Grundvattnets sammansättning är i kombination med grundvattenflödet av stor betydelse för slutförvarets funktion, både på kort och 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 med omnejd ur ett säkerhetsanalytiskt perspektiv och ge det kemiska underlag som krävs för projektering av djupförvaret. Generellt bidrar kemiprogrammet till en övergripande förståelse för hur grundvattensystemet fungerar på förvarsdjup. Hydro-

geokemiska 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 rumslig fördelning av de viktigaste lösta ämnens halter i bergvolymen. Salthaltsfördelningen, de enskilda huvudkomponenterna, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> samt pH är de vanligast förekommande. Av stort värde är dessutom att beskriva de stabila och radioaktiva isotoperna H-2, O-18, S-34, C-14, C-13, H-3 och Sr-87. Fördelningarna av de enskilda lösta ämnens halter är i vissa fall indikativa för specifika kemiska pågående processer.

Mer kunskap nås genom statistisk bearbetning i s k multivariantanalys, som resulterar i 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 t ex de tio viktigaste komponenterna ingå /8-19/. 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 t ex sulfid, karbonat, tvåvärt järn med mera. Detta angreppssätt för hydrokemisk modellering benämns M3 (Mixing an Mass balance Modelling) och har utvecklats med MATLAB som bas.

På senare tid har kunskapen om de mikrobiella processerna ökat /8-30/. Det har visat sig att dessa har stort inflytande på den hydrogeokemiska utvecklingen och därmed den hydrogeokemiska tolkningen. En ständigt återkommande fråga är huruvida grundvattenproven 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 /8-26/ har haft som huvudsaklig uppgift att föreslå lämpliga metoder för att erhålla palaeohydrologisk information, dvs erhålla 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.

För att relevanta vattenkemidata ska kunna tas fram krävs en noggrant genomförd borrhining och provtagning. Ett program för hur vattenprovtagning ska genomföras vid platsundersökningarna har utarbetats /8-1/.

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

I SR 97 användes M3-koden för hydrokemisk modellering för första gången i en säkerhetsanalys. Blandningsförhållanden relaterades mot tidigare och nu rådande hydrologiska förhållanden. Dessutom beräknades jämvikter för de mineralfaser som snabbt jämviktas med lösta ämnen i vattenfasen /8-36/.

Myndigheterna ansåg att ”Sammansättningen av grundvatten och dess fördelning i berggrunden på en kandidatplats bör analyseras och ingå som en betydelsefull del i säkerhetsanalysen, eftersom den kan ge många viktiga ledtrådar om hur både kemiska processer, klimat och hydrologi utvecklats” samt ”för att kunna redovisa t ex buffererosion och kolloidbildning kvantitativt krävs att SKB tar fram en mer detaljerad modell av hur grundvattenkemin kan utvecklas på lång sikt.”

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI:s granskningsPM: SKI anser att modellering och karakterisering av grundvattenkemi, förutom dessa mål, också skall bidra så att förståelsen av den tilltänkta förvarsplatsens geokemiska och hydrologiska utveckling och historik förmår att skapa förtroende för valet av plats och framtagande av scenarier inom säkerhetsanalysen. Platskarakteriseringen behöver ge en betydligt mera detaljerad förståelse av de specifika hydrokemiska betingelserna än den som en säkerhetsanalys utgår ifrån, då det annars blir omöjligt att bedöma om de förenklingar och abstraktioner som använts är rimliga. SKI håller dock med SKB om att den högsta prioriteringen bör vara att undersöka och skapa förståelse för de förhållanden som direkt berör de tekniska barriärernas funktion som aktuella redox-förhållanden, bentonitens stabilitet, kopparkapselns integritet, radionuklidens lösligheter, sorptionsegenskaper med mera.

Beträffande modeller, betonar SKB i FUD-program 98 främst M3-konceptet som endast indirekt tar hänsyn till specifika geokemiska processer som tillskott eller förluster vid blandnings- och massbalansberäkningar. För icke-konservativa komponenter i grundvattnet som kan påverkas av många processer kan därför M3-beräkningarna behöva kompletteras med andra typer av beräkningar. SKI anser att SKB parallellt bör använda både experimentella studier och andra modeller för att så långt som möjligt klarlägga de icke-konservativa komponenternas koncentrationer och fördelning i berggrunden.

## **Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97**

Inom det internationella samarbetet Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes syftar modellövning 5 till att integrera hydro- och kemidata för att beskriva den grundvattenavsänkning som tunneln orsakar i omgivningen. Blandningskonceptet har där använts för att beräkna proportioner av vatten med olika ursprung som sedermera ingått i modellerna för flödes- och transportberäkningar.

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 /8-20/. 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. Situationen under en nedisning analyserades grundligt i säkerhetsanalysen SR 97. Liknande insatser är planerade för permafrostförhållanden.

## **Forskningsprogram**

Det följande beskriver hur tillgängliga metoder kommer att användas vid platsundersökningarna. Idag finns inga planer på någon omfattande metodutveckling.

Hydrokemisk modellering i kommande platsundersökningar planeras innefatta kvantitativa beräkningar av blandningsförhållanden samt massbalansberäkningar av alla data gemensamt. Hydrogeologiska beräkningar av nu rådande flödesförhållanden används som grund för att tolka hydrokemiska data. Det går att se hur grundvattnet strömmar i dagsläget, och då utröna t ex vattenkemins variation mot djupet (i inströmningsområden) och vilken betydelse de mest konduktiva strukturerna har för blandning av olika vattenvolymer som kan skilja sig både i ursprung och sammansättning. Dessutom genomförs

kvantitativa beräkningar av jämviktsförhållanden för varje enskild mineralfas som förväntas kunna uppnå jämvikt.

Följande processer hanteras i en integrerad modellkedja:

- Advektion/blandning, M3-beräkningar.
- Diffusion, analytiska lösningar.
- Reaktionen grundvatten/bergmatris, massbalansberäkningar (M3).
- Upplösning/utfällning sprickmineral, jämviktsberäkningar (PAREEQE, EQ3 m fl).

De kvantitativa beräkningsverktygen kan utnyttjas för att beräkna vilka effekter varje enskild process/reaktion leder till. Till exempel kalcitupplösning/utfällning påverkar pH, karbonathalt och kalciumhalt. Eftersom flera processer samverkar och de dominerande processerna varierat under olika tidsperioder kan modellerna inte fullt ut klargöra i vilken sekvens och i vilken omfattning de olika processerna förekommit. Dagens förhållanden är ett resultat av olika processer och reaktioner som pågått i varierande omfattning under lång tid.

Följande processer hanteras enskilt, genom enkla överslagsberäkningar, separata modellstudier eller liknande:

- Mikrobiella processer.
- Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial.
- Kolloidomsättning.
- Gasbildning/gaslösning.
- Metanisomsättning.
- Saltutfrysning.

### **8.2.22 Radionuklidtransport – advektion och dispersion**

Under denna process behandlas advektion och dispersion för transportberäkningar. Blandning av vatten i naturliga system hanteras under processen advektion/blandning, se avsnitt 8.2.11.

#### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I Processrapporten konstaterades att både förståelsen för och beskrivningen av advektion är god. Beskrivningen av dispersion är däremot starkt modellberoende, då olika modellkoncept beskriver spridningsprocesserna på olika sätt, se även avsnitt 8.2.28.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i FUD-program 98 eller dess granskning.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98 och SR 97***

Ingen ny kunskap har tillkommit.

#### ***Forskningsprogram***

Se avsnitt 8.2.28.

## **8.2.23 Radionuklidtransport – molekylär diffusion samt matrisdiffusion**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I Processrapporten konstateras att begreppet flödesvätt yta, som är av avgörande betydelse för matrisdiffusion, är behäftat med betydande konceptuella osäkerheter. Ytterligare utveckling av modellkoncept och själva begreppet flödesvätt yta efterlyses.

I SR 97 Huvudrapport anges att metoderna för bestämning av transportmotståndet (som beror bl a på flödesvätt yta) kan förbättras. Både fältexperiment, t ex TRUE-projekten på Äspö och alternativa modellkoncept anges som möjliga vägar för att förbättra dessa uppskattningar.

Myndigheternas främsta påpekande är att tolkningen av flödesvätt yta, inklusive metoder som ger nödvändiga fältdata för att stödja dess användning, bör utvecklas.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

SKI konstaterar i sin granskning av FUD-program 98 att mätmetoder för transportegenskaper (specifikt retentionsparametrar) bör utvecklas. Detta gäller speciellt för markbaserade metoder som kan utnyttjas i samband med de planerade platsundersökningarna. Mycket av det arbete som görs för att förbereda och planera inför platsundersökningsskedet sker inom ramen för specifika projekt. För studier av transportparametrar finns en speciell grupp som utreder vilka tillgängliga metoder som ska användas samt vilka nya metoder som ska utvecklas.

SKB säger i FUD-program 98 att BIPS-tekniken ska utvecklas för att kunna uppskatta sprickors retentionsegenskaper i fält. SKI stödjer denna utveckling i sin bedömning av FUD-program 98.

### ***Nyvännen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Diffusion av radionuklider i bergets vattenfyllda mikrosprickor – matrisdiffusion – har undersökts genom att mäta elektrisk ledningsförmåga. Målen har dels varit att utveckla en ny mätmetod, dels att studera mekanismerna för diffusion. Resultaten av experimenten finns samlade i en nyligen publicerad doktorsavhandling /8-37/. Metoden är användbar i laboratorium och betydligt snabbare än konventionell mätteknik. Det välkända faktum att alkalijoner rör sig relativt snabbt kunde förklaras med en modell där jonerna är rörliga i ett diffust sorptionslager nära mineralytan. Detta kallas ytdiffusion och är ett omstritt fenomen, men inverkan på den totala diffusionen hos t ex cesium är mycket påtaglig.

Laboratorieexperiment med såväl sorption som diffusion i kristallint berg har utförts i anslutning till TRUE-försöken på Äspölaboratoriet. Laboratorieexperimenten finns redovisade i /8-38/ samt i en doktorsavhandling /8-39/. Motsvarande fältresultat inom TRUE och utvärdering av resultaten finns redovisade i /8-40/ samt /8-41/. Resultaten tyder på en ökad retention i fält relativt resultaten från laboratorieundersökningarna. Detta tillskrivs en zon närmast sprickan i det studerade spricksystemet med förhöjd porositet och sorption /8-40/.

Baserat på de alternativa modellkoncept för grundvattenflöde som användes inom SR 97 har ytterligare simuleringar med diskreta modeller gjorts för att förstå hur den flödesvätt ytan och transportmotståndet beror på ingående parametrar som definierar spricknätverket /8-42/. Resultaten indikerar att det linjära samband som ofta antas mellan transportmotstånd och flödesvätt yta i kontinuum-konceptualiseringar inte är uppfyllt.



Vidare statistisk analys av resultaten indikerar att fördelningen av de lokala hastigheterna i spricknätverket samt fördelningen av en parameter relaterad till den våta ytan uppvisar "power-law"-egenskaper trots att ingående sprickdata beskrivs av traditionella fördelningar /8-43/. Dessa resultat visar tydligt på behovet av ytterligare forskning för att korrekt konceptualisera och förstå innebörden av begreppet flödesvätt yta.

Användning av BIPS-tekniken inom TRUE-försöken på Äspö har visat att BIPS i första hand är användbart tillsammans med flödesloggning för att identifiera dominerande konduktiva strukturer och sätta upp strukturmodeller. Projekten med att försöka skatta retentionsparametrar från BIPS-data kommer inte att fortsätta under nästkommande treårsperiod.

### ***Forskningsprogram***

Simuleringar med diskreta spricknätverksmodeller kommer att fortsätta. Syftet med dessa simuleringar är att öka förståelsen av flödesrelaterade transportparametrar som flödesvätt yta. Vidare kommer resultaten även fortsättningsvis att utnyttjas som grund för statistisk analys och förenklade analytiska beräkningar. Även metoder för hur flödesvätt yta kan uppskattas i fält med enskilda metoder eller med kombinationer av metoder ska undersökas.

Baserat på resultaten i /8-37/ har ett forskningsprojekt inletts som syftar till att kunna mäta bergets diffusivitet direkt i fält. En bättre förståelse av några av de grundläggande processer som påverkar diffusion in situ kan dock krävas innan metoden kan anses redo för applicering inom platsundersökningsskedet.

För framtida säkerhetsanalyser bör en samsyn etableras mellan inblandade aktörer av hur retention (specifikt matrisdiffusion) hanteras i matematiska modeller samt hur och vilka data som bör mätas i fält. Dessutom kan möjligheten undersökas att utnyttja mer lättanvända begrepp än flödesvätt yta och transportmotstånd för att enkelt beskriva bergets retentionsförmåga. SKB kommer att driva dessa frågor antingen i internationella fora (t ex EU eller OECD/NEA) eller i bilaterala sammanhang.

I säkerhetsanalysen modelleras processen integrerat med övriga transportprocesser, se avsnitt 8.2.28.

## **8.2.24 Radionuklidtransport – sorption**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I granskningen av SR 97 konstaterade myndigheterna att de utnyttjade  $K_d$ -värdena kan ha haft för snäva osäkerhetsintervall, vilket i sin tur påverkat valet av pessimistiskt värde i analysen. SKB menar att dessa osäkerhetsintervall bäst kan uppskattas då en ytterligare förståelse av de grundläggande mekanismer som styr sorptionen erhålles.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I sin granskning av FUD-program 98 konstaterade SKI att både en god processförståelse (genom t ex ytkomplexeringsmodeller) samt en relevant databas av  $K_d$ -värden för säkerhetsanalysens behov behövs.

I granskningen påpekas även att SKB borde undersöka sorption på mineralytor som beror på utfällning av sekundära faser. Vidare påpekas att SKB borde studera betydelsen av redoxprocesser för sorption. Detta har dock undersökts tidigare ingående på laboratorium /8-44, 8-45/. SKB har även gjort spårförsök med redoxkänsliga ämnen i berget /8-44, 8-40/.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97***

Mekanismerna för sorption av radionuklider på mineralytor har undersökts i detalj. Målet har inte varit att ersätta användningen av  $K_d$ -värden utan snarare att visa på vilket sätt radionuklidjonerna binds till mineralens oxidtytor. Detta ska vara till stöd för bruket av  $K_d$ .

Studier av sorptionsmekanismer redovisas i en doktorsavhandling /8-46/. Resultaten visar att ytcomplexmodellen kan förklara det mesta av den radionuklidsorption som mäts.

### ***Forskningsprogram***

Studier av sorptionsmekanismer på mineralytor kommer även fortsättningsvis att stödjas, åtminstone under nästkommande treårsperiod. Idag bedöms dock inte någon ytterligare forskning krävas för sorption på mineralytor som beror på utfällning av sekundära faser utöver studier av fenomenet i naturen, se avsnitt 8.2.14. Hela fältet bevakas dock med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

Ytterligare demonstrationsexperiment för att belysa betydelsen av redoxprocesser för sorption kommer att genomföras på Äspö med hjälp av CHEMLAB-sonden. Därutöver bedöms området idag inte kräva någon ytterligare forskning eller utveckling.

I säkerhetsanalysen modelleras processen integrerat med övriga transportprocesser, se avsnitt 8.2.28.

## **8.2.25 Radionuklidtransport – speciering**

Vattnets kemiska miljö (pH, redoxförhållanden etc) bestämmer vilken speciering radionukliderna kommer att ha. Detta har betydelse för sorptionen.

Specieringsprocessen diskuteras i avsnitt 4.2.14. I kommande säkerhetsanalyser planeras samma typ av specieringsberäkningar som i SR 97.

## **8.2.26 Radionuklidtransport – kolloidtransport**

### ***Slutsatser i SR 97 och dess granskning***

I SR 97 Processrapporten konstateras att kolloidtransport inte är relevant då de koncentrationer av kolloidalt material som krävs för att processen ska bli viktig inte förekommer i de aktuella grundvattnen. I myndigheternas granskning konstateras dock att kolloidtransport bör kvantifieras samt infogas i konsekvensanalysen speciellt för fall där bufferten inte fungerar som avsett. I ytnära grundvatten kan t ex kolloidal transport antas ge den dominerande transportvägen.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

SKI framförde liknande synpunkter i granskningen av FUD-program 98 som vid granskningen av SR 97. Vidare framhölls i granskningen av FUD-program 98 att betydelsen av kolloider och komplex behöver klarläggas för extrema förhållanden, t ex vid närvaro av cement och organiska ämnen. Sådana undersökningar är tills vidare hänvisade till den forskning som bedrivs med inriktning på slutlig deponering av långlivat låg- och medelaktivt avfall, se kapitel 18.

### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

Förhållandevis många studier har rapporterats på senare år inom kolloidal transport. I en mycket omtalad och omdebatterad studie visas /8-47/ att plutonium vid Nevada Test Site i USA transporterats en betydligt längre sträcka från källan än det avstånd som uppskattas baserat på laboratorieresultat av sorption på den fasta fasen (berget). Detta indikerar att plutonium transporterats sorberat på kolloiderna snarare än löst i vattenfasen. Även om förhållandena vid Nevada Test site inte är jämförbara med svenska förhållanden så har denna studie skapat ett allmänt intresse för kolloider.

Liksom många tidigare studier, visar även laboratorieförsök att kolloider i en spricka kan transporteras snabbare än lösta ämnen /8-48/. Vidare visas att kolloiderna tenderar att fastna i systemet, dvs att utflödet visar lägre koncentrationer än inflödet av kolloider. De två redovisade processerna har uppenbart motstridig inverkan i en eventuell konsekvensanalys. Om kolloidal transport ska inkorporeras i säkerhetsanalysens modellkedja krävs ytterligare forskning för att förstå de viktigaste processer som styr kolloidernas mobilitet. SKB menar dock att kolloider kan hanteras separat, se nedan.

### **Forskningsprogram**

Ett experimentellt demonstrationsprojekt planeras där bildning av kolloider från bentonitbuffert undersöks. Syftet är att studera under vilka betingelser kolloider bildas och är stabila. Baserat på laboratorieexperimentet kan även fältförsök komma att utföras i Äspölaboratoriet, se vidare avsnitt 6.2.19 och 8.2.17.

Även viss modellutveckling planeras med syfte att kunna kvantifiera betydelsen av kolloidal transport för säkerheten. Dessa modeller kommer i första hand att utvecklas som analytiska verktyg för överslagsberäkningar. Visar det sig finnas behov av att inkorporera kolloidal transport även i SKB:s beräkningskedja kommer detta att utvecklas separat.

I övrigt bedöms området idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till ytterligare nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **8.2.27 Radionuklidtransport – transport i gasfas**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Inga frågor för ytterligare forskning identifierades i SR 97 eller dess granskning.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Inte behandlat förutom vad som beskrivs i avsnitt 8.2.4 om gasströmning/gaslösning.

### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

En kunskapssammanställning om tvåfasflöde och gasmigration har nyligen gjorts som ett samarbetsprojekt inom EU och NEA /8-11/. Rapporten identifierar problemställningar, konceptualisering och fortfarande öppna frågor för lagring av använt bränsle i sprickigt berg.

### **Forskningsprogram**

Behovet av litteraturstudien omnämnd i FUD-program 98 kan anses vara omhändertaget med EU/NEA-sammanställningen /8-11/.

Området bedöms idag inte kräva ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap till nya insatser om skäl för detta framkommer.

## **8.2.28 Integrerad modellering – radionuklidtransport**

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Radionuklidtransport modelleras i SR 97 med modellen FARF31 /8-49/ som hanterar processerna advektion, dispersion, molekylär diffusion/matrisdiffusion, sorption samt kedjesönderfall.

I granskningen av SR 97 konstaterade myndigheterna att modellen FARF31 bör jämföras mot mer detaljerade processmodeller och en mer ingående redovisning av förenklingsfel bör redovisas. Specifikt efterfrågas betydelsen av en variabel porositet samt varierande Peclets-tal. Vidare efterfrågas en bättre dokumentation av konceptuella antaganden och matematiska formuleringar; även en redovisning av ett vetenskapligt stöd för modellen efterlyses.

Vidare påpekar myndigheterna att FARF31 kanske bör utvecklas för att inkorporera variabelt penetrationsdjup för matrisdiffusionen.

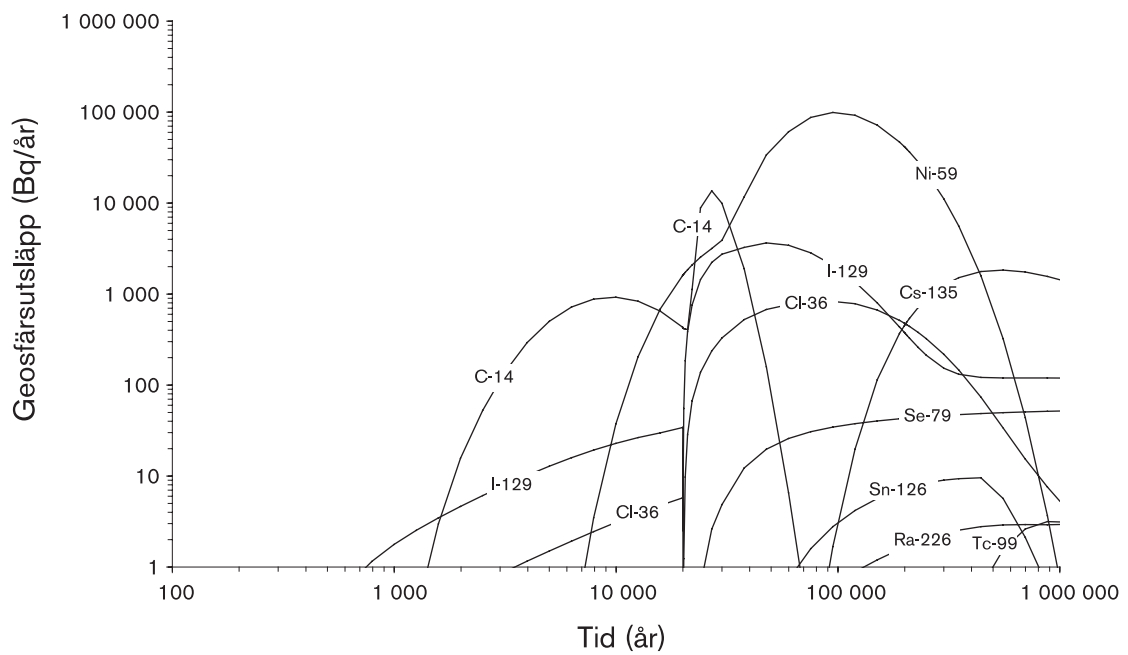
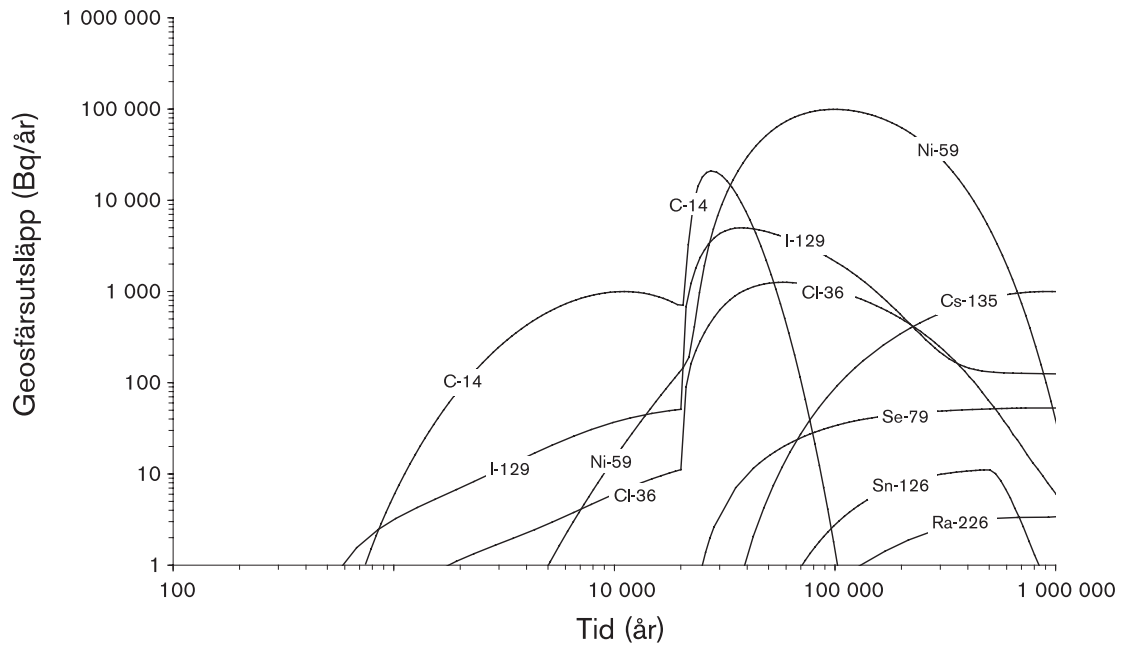
### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

Den integrerade modelleringen diskuterades inte specifikt i FUD-program 98.

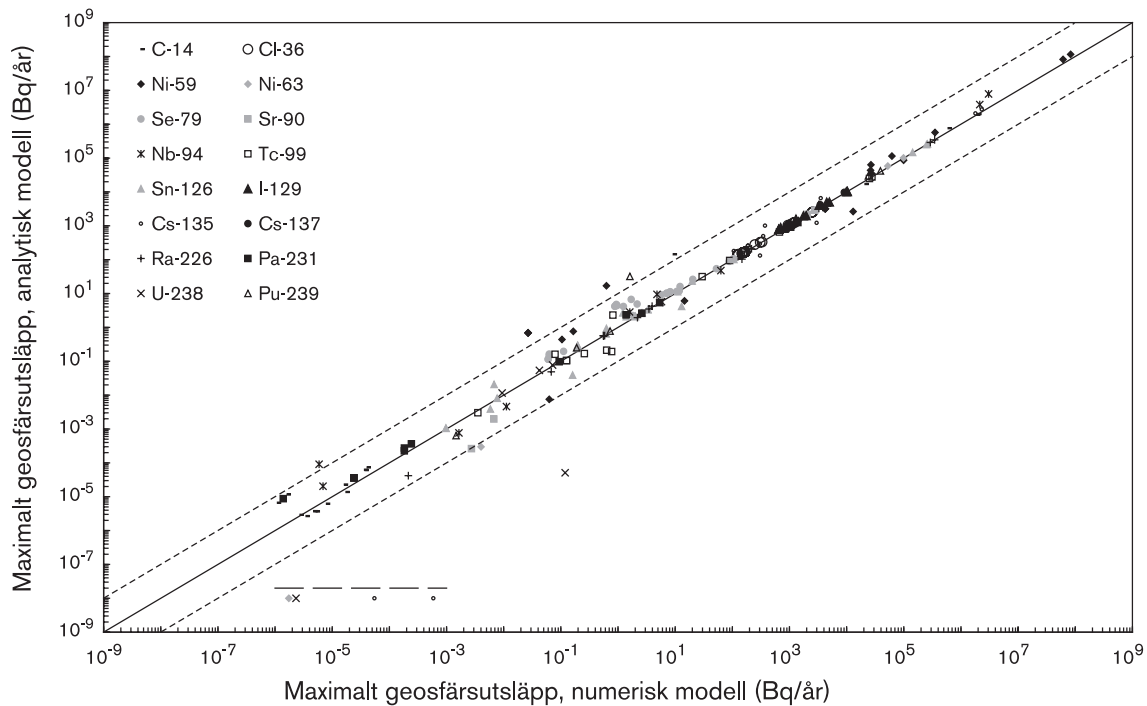
### **Ny vunnen kunskap sedan SR 97 och FUD 98**

#### **Modellstudier**

Sedan SR 97 har en analytisk approximation till FARF31 utvecklats /8-50/, se avsnitt 2.4.1. Överensstämmelsen med den numeriska modellen för beräkningsfallen i SR 97 är i allmänhet god. Figur 8-3 visar en jämförelse av utsläppskurvor från geosfären för ett av beräkningsfallen i SR 97 beräknade med FARF31 respektive med den analytiska modellen.



**Figur 8-3.** Utsläppskurvor från geosfären för ett av beräkningsfallen i SR 97, beräknade med numerisk (övre) och analytisk (nedre) modell.



**Figur 8-4.** Jämförelse av maximala årliga utsläpp för de tre platserna och de 16 viktigaste nukliderna i SR 97, beräknade med numeriska och analytiska modeller. Figuren visar resultaten av nio olika beräkningsfall för var och en av de tre platserna i SR 97.

Figur 8-4 visar en jämförelse av maximala årliga utsläpp i tidsintervallet upp till en miljon år efter förslutning för samtliga osäkerhetsfall i SR 97 /8-51/ inklusive fall där alla parametrar samtidigt ges alltigenom rimliga eller alltigenom pessimistiska värden. Figuren omfattar de tre platser som analyserades i SR 97 och de 16 viktigaste nukliderna. Avvikelse större än en faktor tio beror framför allt på den approximativa behandlingen av dispersion i den analytiska modellen.

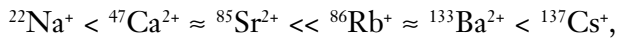
Den analytiska modellen kommer att användas som ett av verktygen i kommande säkerhetsanalyser, bl a för preliminära probabilistiska beräkningar, se vidare avsnitt 2.4.

## Fältstudier

Det övergripande målet med Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE) är att öka förståelsen av transport och fördröjning av radionuklider i sprickigt berg och visa huruvida utnyttjade modellkoncept utgör realistiska beskrivningar av sprickigt berg. Försöken ska också visa om relevanta indata på viktiga modellparametrar kan bestämmas från undersökningar i borrhål, utvärdera om olika modellkoncept är möjliga att tillämpa för modellering av radionuklidtransport samt samla in situ-data på radionuklidmigration.

Ett fältförsök i en tolkad enskild spricka har genomförts i detaljskala (TRUE-1) /8-40/. Ytterligare ett försök, TRUE Block Scale, har genomförts i ett nätverk av strukturer i blockskala och utvärderas och rapporteras för närvarande. Ett försök i detaljskala (Long-Term Diffusion Experiment) som syftar till att beskriva diffusion och sorption i bergmassan i anslutning till en naturlig vattenförande spricka under in situ-förhållanden förbereds för närvarande.

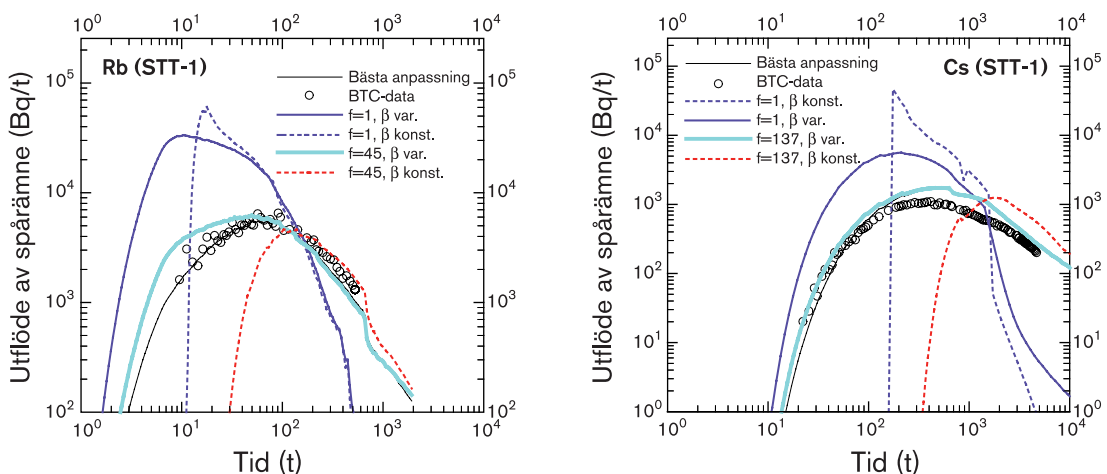
Resultatet av utförda in situ-försök i en tolkad enskild struktur (TRUE-1) visar en relativ fördröjning hos använda spårämnen enligt



vilket också överensstämmer med vad som uppmäts i laboratorium på material från borrhärnor.

Spårförsöken har predikerats med olika modellverktyg inom ramen för arbetet inom Äspö Task Force, se /8-52, 8-53/. Analysen som genomförts av SKB:s experimentgrupp /8-40, 8-41/ innefattar utveckling och test av ett nytt modellverktyg (LaSAR) /8-54/. Modellkonceptet introducerar en parameter  $\beta$  som beror av grundvattenflödet i en enskild spricka och som kontrollerar matrisdiffusionen. Utvärderingen visar att den huvudsakliga retentionsmekanismen är obegränsad diffusion/sorption i matrisen, se figur 8-5, och att porositet, diffusivitet samt sorption i den omvandlade randzonen till den studerade strukturen är högre in situ, jämförd med motsvarande parametervärden från borrhärneprover av intakt berg undersökta i laboratorium.

I det pågående TRUE Block Scale studeras transport och retention i ett nätverk av sprickor i längder om 10–100 meter. En nyckelfråga är här om den längre tids- och längdskalan (större grad av heterogenitet och exponerade ytor) kommer att leda till en större retention. Totalt fyra injiceringar med radioaktiva sorberande spårämnen har genomförts i flödesvägar som involverar en eller flera strukturer över avstånd av 15–100 meter. Resultaten från försök över avstånd av 15 meter i en enskild struktur påvisar retention av motsvarande karaktär som noterats i detaljskala (TRUE-1), medan genombrott av mer sorberande spårämnen över längre sträckor inte noterats. Exempelvis har efter ett halvårs provtagning inget genombrott noterats för Cs (L~100 meter, > 3 strukturer) samt för Rb (L~40 m,  $\geq 1$  struktur). Denna preliminära indikation av större grad av retention i blockskala kommer att följas upp genom noggrann jämförelse mellan utförda modellprediktioner och nya fältdata från det fortgående experimentet.



**Figur 8-5.** TRUE-1. Prediktiv kapacitet hos den upprättade LaSAR-modellen av den studerade strukturen.  $f=1$  motsvarar prediktion baserad på laboratedata från intakt matrisberg (endast jämviktssorption),  $f \neq 1$  motsvarar utvärderad faktor av förhöjd diffusion in situ i förhållande till laborarieparametrar på matrisberg (jämviktssorption samt diffusion/sorption i bergmatrisen),  $\beta$ =var och  $\beta$ =konst, motsvarar prediktion med en fördelning, respektive med ett konstant effektivt värde på  $\beta$ . Bästa anpassning innebär att  $f=1$ ,  $\beta$ =var och inkluderar även sorption i sprickfyllnadsmaterial.

## **Forskningsprogram**

### **Modellstudier**

Under treårsperioden kommer både modellstudier och modellutveckling att ske. Specifikt bör antagandet att spridning längs strömrör kan beskrivas med en dispersionsterm (Peclets-tal) utvärderas med hjälp av alternativa konceptuella modeller för radionuklidtransport.

Transportmodellen i SR 97, FARF31 /8-50/, bör uppdateras så att flödesrelaterade transportdata från diskreta modeller (transportmotstånd och/eller flödesvätt yta) direkt kan utnyttjas som indata i modellen.

FARF31 bör vidare jämföras mot modeller med högre processkomplexitet. Specifika punkter som kan behöva analyseras är effekten av en matris med variabla sorptions- och diffusionsegenskaper (t ex variabilitet i penetrationsriktningen eller variabilitet längs med flödesbanor) och/eller effekten av diffusion i den mobila vattenfasen. Idag finns mer komplexa modeller tillgängliga som kan användas för detta syfte. Under närmaste treårsperioden kommer Äspö Task Force att i Task 6 beskriva transport av radionuklider med olika modellkoncept i både en enskild spricka och i ett spricknätverk.

Frågeställningarna ovan kan förhoppningsvis delvis besvaras inom Task 6. För samtliga viktiga modeller i säkerhetsanalysen ska validitetsdokument upprättas. I detta dokument kommer konceptuella antaganden och matematiska formuleringar att diskuteras, se även avsnitt 2.4.1. Även det vetenskapliga stöd som finns för modellen kommer att redovisas.

### **Fältstudier**

#### **TRUE**

En kvarvarande konceptuell osäkerhet är hurvida den noterade retentionen i TRUE-1 alternativt kan tillskrivas diffusion/sorption i sprickfyllnadsmaterial i den studerade strukturen, eller om den noterade förhöjda retentionen kan tillskrivas transport i ett tredimensionellt nätverk av sprickor (större flödesvätt yta) som skulle kunna generera en retentionseffekt motsvarande den tolkade förhöjda diffusion/sorption i randzonen till den studerade strukturen. En injicering av epoxy med efterföljande utbrytning och analys av den porvolym och de flödesvägar som påverkats av det genomförda experimentet förväntas klarlägga dessa frågor.

En viktig del av kommande arbete är integreringen av förståelsen från försök i detaljskala och blockskala där det planerade arbetet inom Task 6 i Äspö Task Force, se Modellstudier ovan, utgör en del. Med utvärderingsresultatet från TRUE Block Scale som bas förväntas nya hypoteser kunna ställas upp som kan angripas med nya insatser i laboratorium och/eller i fält. Bl a förutses experiment som, i kombination med modellering, kan utnyttjas för att förbättra förståelsen och kvantifieringen av den flödesvätt ytan.

Tidigt under TRUE-projektet identifierades ett behov av att genomföra ett diffusionsförsök in situ i intakt matrisberg. Detta främst för att undvika effekter av de mekaniska avlastningsfenomen som uppstår när en borrhärna frigörs på stort djup, och för att möjliggöra jämförelse med de värden på diffusivitet som bestäms på kärnprover i laboratorium. Försökskonceptet i det planerade Long-Term Diffusion Experiment (LTDE) inkluderar studium av diffusion och sorption i anslutning till en naturlig vattenförande spricka.



### ***CHEMLAB***

I CHEMLAB-sonden vid Äspö kommer transport av aktinider och redoxkänsliga nuklider i en spricka att studeras. Arbetet beräknas pågå under hela år 2001 och halva 2002. Samarbete med Institut für Nukleare Entsorgung ger tillgång till kunskande och erfarenhet om aktinidkemi.



## 9 Biosfär

I FUD-program 98 beskrevs SKB:s biosfärsprogram för de kommande sex åren. Efter drygt två år kan det konstateras att programmet i stort genomförts planenligt och att satsningarna givit önskade resultat. Drygt 30 rapporter har producerats under perioden. Dessutom har tre säkerhetsanalyser /9-1, 9-2, 9-3/ genomförts där biosfären haft en mera detaljerad roll än tidigare. Ett program för platsundersökningar av biosfären har tagits fram.

Ambitionen under den kommande treårperioden är att befästa och fördjupa kunskaperna i pågående projekt med bl a utökad publicering i internationella tidskrifter, samt att genomföra återstående delar.

De kunskaper och data som förväntas från platsundersökningarna bör fördjupa förståelsen för många biosfärsprocesser och skapa möjligheter att utveckla moderna modeller för de säkerhetsanalyser som ska baseras på platsdata.

Vid platsundersökningarna kan också nya fenomen eller problem uppträda, vilket kan kräva riktade forskningsinsatser. Dessutom behöver metoder utvecklas och testas för analys av insamlade data. Insamlingen av data förväntas också skapa intresse hos svenska och internationella forskargrupper som arbetar med radioekologi och miljöproblem.

### 9.1 Bakgrund

De ytnära ekosystemen eller biosfären är den del av jorden där de flesta organismer, djur, växter och människor lever. I biosfären uppkommer konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från förvaret i form av dos till människa och andra organismer. Beräkningar av omsättningen av radionuklider i biosfären och de doskonsekvenser detta leder till är därför en viktig del av en säkerhetsanalys. De beräknade konsekvenserna används dels för att visa huruvida myndigheternas krav på säkerhet och gränsvärden som uttryckts i doser är uppfyllda, dels som en mätsticka för jämförelse av olika anläggningar, tekniska lösningar eller lokaliseringar. Trovärdiga beräkningar kräver att händelser och processer i biosfären beskrivs på ett realistiskt sätt med motiveringar för 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 platsundersökningar 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.

## 9.2 Granskningarna av FUD 98, SR 97 och SFL 3-5

Här följer de viktigaste kommentarerna från olika granskare till biosfärsprogrammet i FUD 98, SR 97 samt den preliminära säkerhetsanalysen av SFL 3-5. Granskningen av Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet /9-4/ har nyligen avslutats. Under hösten 2001 kommer den förnyade säkerhetsanalysen av SFR, projekt SAFE, att granskas. Synpunkter också från dessa granskningar kommer att om möjligt arbetas in i forskningsprogrammet för den kommande sexårsperioden. Generella kommentarer bemöts direkt nedan, specifika synpunkter kommenteras i den följande programbeskrivningen.

### 9.2.1 FUD-program 98

SSI skriver i sitt remissvar att biosfärsstudierna har legat långt efter andra ämnesområden, men att SKB har tillfredställande ambitioner och att den systemekologiska ansatsen som görs är värdefull. Samtidigt menar SSI att det är långt kvar till att nå det övergripande målet av trovärdiga konsekvensberäkningar.

SKB avser att med de insatser som gjorts och de som planeras öka trovärdigheten i biosfärsanalyserna.

SSI anser att SKB bör prioritera studium av osäkerheter i beskrivningen av dagens biosfär och utreda hur biosfären utvecklas i en avlägsen framtid.

Konceptuella osäkerheter hanteras i samband med processbeskrivningar och alternativa systemekologiska modeller, se avsnitt 9.3 och 9.4. Osäkerheter ingår också i de probabilistiska beräkningar som görs för biosfären. De kommande platsundersökningarna förväntas ge ett gott underlag för osäkerheter i data. Långtidsutvecklingen har bl a hanterats i SAFE med att rekonstruera den platsspecifika utvecklingen i tiden (se avsnitt 9.9).

SKI, SSI och SGU anser att SKB bättre bör utreda och redovisa vilken betydelse biosfärförhållandena har som platsvalskriterier inför val av områden. SSI vill ha redovisning för de aktuella ekosystem som ingår i urvalsunderlaget samt en preliminär redovisning av hur SSI:s föreskrifter /9-5/ kan uppfyllas.

SR 97 ger en preliminär redovisning av hur SSI:s föreskrifter kan uppfyllas och pågående arbete i planeringen av platsundersökningarna ger en uppfattning om platsernas biosfär. Där har inget framkommit som radikalt skiljer sig från vad som redovisas i SR 97 och SAFE.

### 9.2.2 SR 97 och SFL 3-5

Resultaten från säkerhetsanalysen SR 97 och den preliminära säkerhetsanalysen av SFL 3-5 har granskats av internationella experter /9-6, 9-7/. SKI och SSI har granskat SR 97 och sammanfattat sina synpunkter /9-8/.

Över lag är granskarna positiva till SKB:s hantering av biosfären i säkerhetsanalyserna. Man påpekar brister i argumentation och dokumentation för valda typekosystem, modeller och data och saknar en struktur med processbeskrivningar. Granskarna påpekar att en skogsmodell saknas och antagandena om torvmossen är ofullständiga liksom beskrivningen av övergången och växelverkan mellan geosfär och biosfär.

SKB uppfattar att granskarna anser att den föreslagna metodiken för biosfärshanteringen är lovvärd och delar uppfattningen att förståelsen och dataunderlaget behöver förbättras. En stor del av följande beskrivning av forskningsprogrammet avser att förbättra förståelsen, bl a med processbeskrivningarna. Skogsmodellen och förståelsen av de viktigaste processerna är ett eget delområde för utvecklingsarbete liksom myrmarker, sediment och transportprocesser i biosfären vilket beskrivs nedan.

Flera av granskarna efterlyser ett klargörande av hur riskkriterierna ska hanteras samt underbyggande resonemang kring hur SKB har valt vissa kriterier. Dessutom vill myndigheterna att SKB klargör biosfärens roll i säkerhetsanalysen.

Som framgår i avsnitt 9.11 avser SKB utreda dessa frågor, vilket också kräver diskussioner med SSI om hur myndighetens föreskrifter ska tillämpas. Sådana diskussioner pågår.

Kasam och SSI anser att tidsberoende biosfärer är viktiga samt att utvecklingen och händelser de första 1 000 åren bör beskrivas bättre.

I SAFE har tidsberoende biosfärer utvecklats samt en ansats gjorts att beskriva de första 1 000 åren.

Myndigheterna saknar en redovisning av miljökonsekvenser i SR 97 och anser att detta arbete måste prioriteras. Man konstaterar att den ekosystembaserade analys som SKB utvecklar är ett lämpligt redskap för denna bedömning.

Det är SKB:s avsikt att utveckla de systemekologiska modellerna för detta ändamål, se avsnitt 9.4 och också att precisera ett ramverk för hur miljökonsekvenserna ska hanteras bl a i samarbete med SSI i EU-projektet FASSET, se avsnitt 9.10 och 9.11.

Myndigheterna har dessutom synpunkter på att biosfären inte är tillräckligt redovisad i huvudrapporterna samt påpekar detaljer vad gäller brister i dataunderlaget.

SKB avser att åtgärda bristerna inför nästa säkerhetsanalys för djupförvaret och kommande platsundersökningar.

### **9.3 Förståelse och konceptuella modeller**

En sammanställning av hur förståelsen för biosfären utvecklats genom åren i SKB:s program finns i /9-9/.

Myndigheternas föreskrifter kräver av kommande säkerhetsanalyser dels en mer realistisk beskrivning av biosfären, dels en uppskattning av konsekvenserna för omgivande fauna och flora /9-5/. 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 9.4. Angreppssättet är systemekologiskt, där hänsyn tas till både biologiska och abiotiska processer i ekosystemen. Kunskapen om processerna finns inom många områden, t ex 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 att få en trovärdig beskrivning av biosfärens utveckling behöver de konceptuella modeller som används stå i samklang med den vetenskapliga uppfattningen inom förutom radioekologi också ekologi, ekotoxikologi och miljövård.

### Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98

SKB har påbörjat arbetet med att sammanställa processbeskrivningar på liknande sätt som för övriga förvarsdelar /9-10/. Arbetet är omfattande på grund av mångfalden processer i biosfären vilket kräver kartläggning av och fokusering på de väsentligaste processerna /9-11/. Interaktionsmatriser har varit ett användbart redskap för att identifiera viktiga processer. I SAFE-projektet har en generell biosfärsmatris som kan användas för olika förvarstyper tagits fram /9-12/, se figur 9-1. Matrisen kommer att bearbetas under 2001 för att utgöra en grund för att vidareutveckla och uppdatera kunskaperna på ett systematiskt sätt. Matrisen har redan använts för att definiera de parametrar och variabler som behöver bestämmas i platsundersökningarna /9-13/, se vidare avsnitt 9.12.

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 Kalmar Högskola. Resultat från detta arbete presenteras vidare nedan inom respektive programområde.

Några övergripande arbeten som sammanställer aktuella radioekologiska kunskaper har genomförts. En genomgång av bioackumulationsfaktorer i akvatiska miljöer och en statistisk analys av samband mellan olika omvärldsfaktorer har gjorts /9-14, 9-15/. En litteraturstudie över hur olika jodisotoper förekommer och hur de rör sig i mark har

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	GEOSPHERE (BC)	Erosion/ weathering	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE	a) Erosion/westh, b) Changes in rock surface location	Discharge/ recharge	Discharge/ recharge	Mass flux	Gas transport	Heat transport	Contaminant transport	NONE
2	a) Mech. load b) Consolidation (Water flow = 10%)	Quaternary deposits	a) Settlement b) Deposition	a) Settlement b) Consumption	a) Settlement b) Consumption	a) Settlement b) Consumption	a) Settlement b) Consumption	a) Settlement b) Consumption c) Material supply	Relocation	a) Water transport b) Evaporation	NONE	a) Resuspension b) Sorpt./desorp. c) Heat storage	a) Resuspension b) Heat transport c) Heat storage	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	Sorption/desorpt.	Export
3	a) Root penetration b) Tunnels c) Biological	Root growth	Primary producers (a)	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Material supply		Root uptake	a) Interception b) Retard./Accret. c) Uptake/Excret. d) Particle prod.	a) Uptake/Excret. b) Particle prod.	a) Gas uptake/rel b) Part. trap/prod c) Wind retard.	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	Export detached outflow of plankton
4	Potential intruder	a) Decomposition b) Bioturbation	a) Stimul./Inhib.	Decomposers (a,b,c)	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Material supply		Decomposition	a) Water-pumping b) Retard./Accret. c) Uptake/Excret. d) Movement	a) Uptake/Excret. b) Particle prod.	a) Gas uptake/rel b) Part. trap/prod	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	Export
5	Potential intruder	Bioturbation	a) Stimul./Inhib. b) Feeding	Filter feeders (a,b,c)	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Material supply		NONE	a) Retard./Accret. b) Uptake/Excret. c) Particle prod.	NONE	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	Export detachment spawn	
6	Potential intruder	Bioturbation	a) Stimul./Inhib. b) Feeding	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Eating mushrooms	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	Herbivores (a)	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Material supply		NONE	a) Movement b) Retard./Accret. c) Uptake/Excret.	a) Uptake/Excret. b) Particle prod.	a) Gas uptake/rel b) Part. trap/prod	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	Export
7	Potential intruder	Bioturbation	a) Stimul./Inhib. b) Feeding	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Feeding	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	Carnivores (a,b,c)	a) Stimul./Inhib. b) Food supply	a) Stimul./Inhib. b) Food supply c) Material supply		NONE	a) Movement b) Retard./Accret. c) Uptake/Excret.	a) Uptake/Excret. b) Particle prod.	a) Gas uptake/rel b) Part. trap/prod	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	Export swimming running
8	NONE	Disturbance (dredging, digging)	a) Stimul./Inhib. b) Feeding c) Dispersal/ d) Extirmination	a) Stimul./Inhib. b) Feeding c) Dispersal/ d) Extirmination	a) Stimul./Inhib. b) Feeding c) Dispersal/ d) Extirmination	a) Stimul./Inhib. b) Feeding c) Dispersal/ d) Extirmination	a) Stimul./Inhib. b) Feeding c) Dispersal/ d) Extirmination	Humans (a)	digging dumping	a) Water extraction b) Air pollution	a) Movement b) Retard./Accret. c) Uptake/Excret. d) Covering	a) Excretion b) Filtering c) Pollution	a) Gas uptake/rel b) Part. trap/prod c) Pollution d) Wind retard/acc.	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp. d) Antropogen eff.	a) Uptake/sorp. b) Excretion c) Degradation d) Growth	a) Export of energy b) Emigration?
9	NONE	Relocation	shelter insulation						Topography	Water transport	a) Radiation b) Adiabatic temp. change	NONE	a) Windfield changes b) Air pressure		NONE	NONE
10	a) Rech./disch. b) Press. change c) Mass flux d) Erosion/weath.	a) Water content change	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water uptake	NONE	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water use	Pingo formation	Water in quaternary deposits	Discharge (recharge)	a) Erosion b) Mixing c) Dens. effects	a) Evapo/Cond. b) Sublimation c) Dens. effects	a) Heat transp. b) Heat storage	Mixing	Export
11	a) Rech./disch. b) Press. change c) Mass flux d) Erosion/weath. e) Ice-load	Erosion (ice-scoring)	a) Settlement b) Dispersal c) Water uptake	a) Settlement b) Relocation c) Water uptake	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water uptake	a) Settlement b) Water use	a) Water level? b) Ice on surface?	Recharge (discharge)	Surface water	a) Mixing b) Dens. effects	a) Evapo/Cond. b) Sublimation c) Erosion (ice-spray/snowdrift)	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat storage d) Heat reflect/scatt. e) Adiab. temp/change f) Phase changes	Mixing	Export/import
12	a) Mass flux b) Erosion/weath.	a) Sedimentation b) Resuspension c) Light attenu.	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Relocation	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Relocation	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	NONE	Water transport	Water transport	Water composition	a) Spray/Snowdrift b) Dissol./Degas.	a) Exo/Endo react. b) Heat storage c) Light reflect/scatt. d) Adiab. temp.	a) Sorpt./desorp. b) Dissol./precip.	Export
13	Gas transport	a) Erosion b) Deposition c) Oxidation	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Depos./Remov.	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Depos./Remov.	NONE	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Depos./Remov.	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Depos./Remov.	a) Settlement b) Stimul./Inhib. c) Depos./Remov.	NONE	a) Water transport b) Evapo/cond. c) Precipitation d) Wind stress	a) Water transport b) Evapo/Cond. c) Precipitation d) Wind stress	a) Precipitation b) Deposition c) Evapo/Cond. d) Dissol./Degas.	Gas Atmosphere	a) Radiation b) Exo/Endo react. c) Heat transp. d) Heat storage e) Adiab. temp/change f) Phase changes	a) Mixing b) Sorpt./desorp. c) Photochem. reactions??	Export
14	a) Heat transport b) Erosion/westh.	Weathering	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	a) Settlement b) Stimul./Inhib.	Volume expansion/ contraction	Phase transitions	a) Phase transitions b) Convection	a) Phase transitions b) Property changes	a) Pressure change b) Phase transitions	Temperature	a) Kinetics & chem. equl b) Phase transitions	Export of heat
15	Contaminant transport	a) Surface dep./uptake b) Irradiation	a) Int. exposure b) Ext. exposure	a) Int. exposure b) Ext. exposure	a) Int. exposure b) Ext. exposure	a) Int. exposure b) Ext. exposure	a) Int. exposure b) Ext. exposure	a) Int. exposure b) Ext. exposure	NONE	NONE	NONE	a) Radiolysis b) Stab. isotopes c) Chem. react.	Phase transition	Heat from decay	Radionuclides and toxicants	Export
16		Import	a) Import b) Irradiation	Import	Import	Import	Import	a) Import of energy b) Immigration	Land rise	Import	a) Sea level changes b) Sea currents	Import	a) Import of heat b) Phase transp.	Import of heat	External load	External conditions

Figur 9-1. Exempel på generell interaktionsmatris som är under utveckling och används för säkerhetsanalysen av SFR.

genomförts /9-16/. En kunskapssammanställning av biosfärsparametrar för radionukliderna i de senaste säkerhetsanalyserna pågår och ska utgöra grunden till en radionuklidkatalog. I BIOMASS och EU-projektet FASSET, se avsnitt 9.10, sammanställs kunskaper inom radioekologi samt om effekter på miljön.

I detta sammanhang kan också konstateras att det institutionella stödet för forskningsämnet radioekologi på senare år minskat kraftigt i Sverige.

### **Utvecklingsprogram**

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. Processammanställningen kommer att fortsätta. I övrigt kommer de nyvunna kunskaperna i nedanstående delprogram (t ex modellutveckling, transportprocesser, skogsekosystem, myrmark, sediment) att fångas upp.

## **9.4 Modellutveckling**

SKB:s modelleringar av radionuklidspridning i biosfären i säkerhetsanalysen har genomförts med verktygen BIOPATH och PRISM. Dessa har utvecklats av Studsvik EcoSafe 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 bl a insatser från SKB, vilket sammanfattas i en genomgång av Edlund m fl /9-9/ och i de senaste säkerhetsanalyserna /9-17, 9-18/. 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 /9-19 till 9-22/. Konceptet baseras till stora delar på användandet av generiska överföringsfaktorer till olika reservoarer (compartments) vilket förutsätter att systemet som modelleras befinner sig i jämvikt. Dessutom baseras överföringsfaktorerna i många fall på empiriska data utan en mekanistisk förklaringsgrund. 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 /9-23/.

I FUD-program 98 anges att alternativa modeller behövs för att validera de antaganden som görs. Andra modeller behövs också för att kunna tillvarata platsspecifik information om processer och tillstånd i ekosystemen. Dessutom behövs en mer realistisk beskrivning av biosfären för att möta de krav som ställs av myndigheterna på en analys av ett djupförvars framtida konsekvenser. För att uppskatta konsekvenserna för omgivande fauna och flora enligt föreskrifterna /9-5/ krävs modeller som baseras på radionuklidflödet i hela ekosystemet och inte enbart för specifika vägar som är kritiska för människan t ex brunn eller komjolk.

I FUD-program 98 hävdas vidare att användningen av processbaserade modeller är en framkomlig väg att lösa en del av dessa problem. Överföringen mellan reservoarer blir baserad 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 (t ex 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 icke nuklidspecifika, t ex avrinningsområdets geometri, solinstrålning, vattenbalans och ekosystemets sammansättning.

### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98**

I SR 97 analyserades typ ekosystemen sjö, rinnande vatten, hav (skärgård och kust), myr, jordbruksmark och brunn. BIOPATH-modeller som beskrev de olika typ ekosystemen utvecklades /9-17/. De tre platserna i säkerhetsanalysen gav möjlighet att utnyttja plats-specifika data för biosfärsmodellerna. Biosfären ovan för de tre förvarsområdena indelades i rutor med storleken 250 x 250 meter som associerades till något av ovanstående typ-ekosystem baserat på tillgänglig kartinformation /9-24/. Platsspecifika data baserade på en litteratursammanställning utnyttjades där det var möjligt /9-25/.

Fördelen med detta angreppssätt är att orsaker till variationen i dosuppskattningen kan separeras. Osäkerheten i data som användes för modellerna stod för en variation av ungefär en storleksordning i dos, medan valet av typ ekosystemet stod för variationer upp till sju storleksordningar.

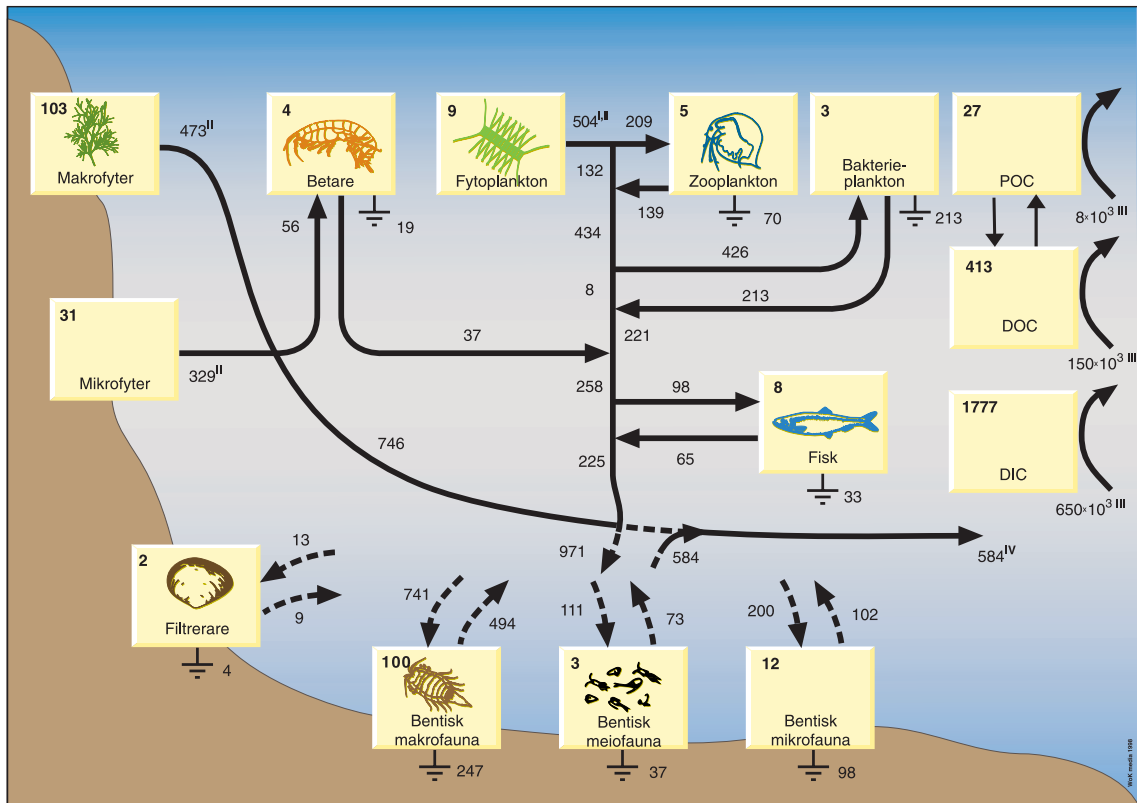
Osäkerhetsanalyser och känslighetsanalyser visade att de biologiska processerna behöver beskrivas bättre och att de fysikaliska parametrarna behöver mätas bättre /9-17, 9-26/. I SR 97 var dock den platsspecifika informationen begränsad, eftersom få biosfärsundersökningar har gjorts i de gamla typområdena. Det gav svårigheter att indela områdena i typbiosfärer samt osäkerheter i parametervärden.

Inom projekt SAFE, säkerhetsanalysen för SFR, vidareutvecklades BIOPATH-modellerna för olika typer av ekosystem och en tidsberoende utveckling infördes /9-18/. Dessutom insamlades platsspecifika biosfärdata och undersökningar genomfördes för att erhålla bättre dataunderlag /9-27/.

För SAFE utvecklades nya modeller för kustområdet som baseras på systemekologiska principer /9-28, 9-29/. De beskriver flödet av C-14 genom näringsväven och koncentrationen av C-14 beräknas i olika reservoarer utan att använda koncentrationsfaktorer, se figur 9-2. Överföringen av radionuklider baseras enbart på mekanismer som födointag, fotosyntes och nedbrytning. Denna modell testas för tillfället för cesium. Resultaten är lovande och utvärderas under 2001.

En översyn av beräkningsverktyg har påbörjats för att utvärdera potentialen av BIOPATH- och PRISM-verktygen gentemot andra moderna modelleringsverktyg, både generella grafiska modelleringsprogram och specifika program för säkerhetsanalyser.





- I Inkluderar hela den primära produktionen från plankton. (Bakterieplankton 33 procent och fytoplankton 67 procent).
- II Nettoproduktion (bruttoproduktion minus respiration).

- III Årlig omsättning av POC och DOC.
- IV Mängd kol som exporteras från området.

**Figur 9-2.** Exempel på kolflödesmodell från kustområdet vid SFR. Rektanglar representerar olika reservoarer med mängden i ton, pilarna anger flödet av organiskt kol i ton per år, /19-28, 9-29/.

### Utvecklingsprogram

De systemekologiska modellerna kommer att vidareutvecklas och valideras mot fältobservationer (t ex Tjernobylutsläpp och omgivningskontrollen vid kärnkraftverken). En fortsatt översyn och utvärdering av beräkningsverktygen BIOPATH och PRISM kommer att göras så att de kan anpassas till en modern beräkningsmiljö och plats specifika data kan användas. Detta förutsätter även en integration med GIS databaser och andra numeriska verktyg.

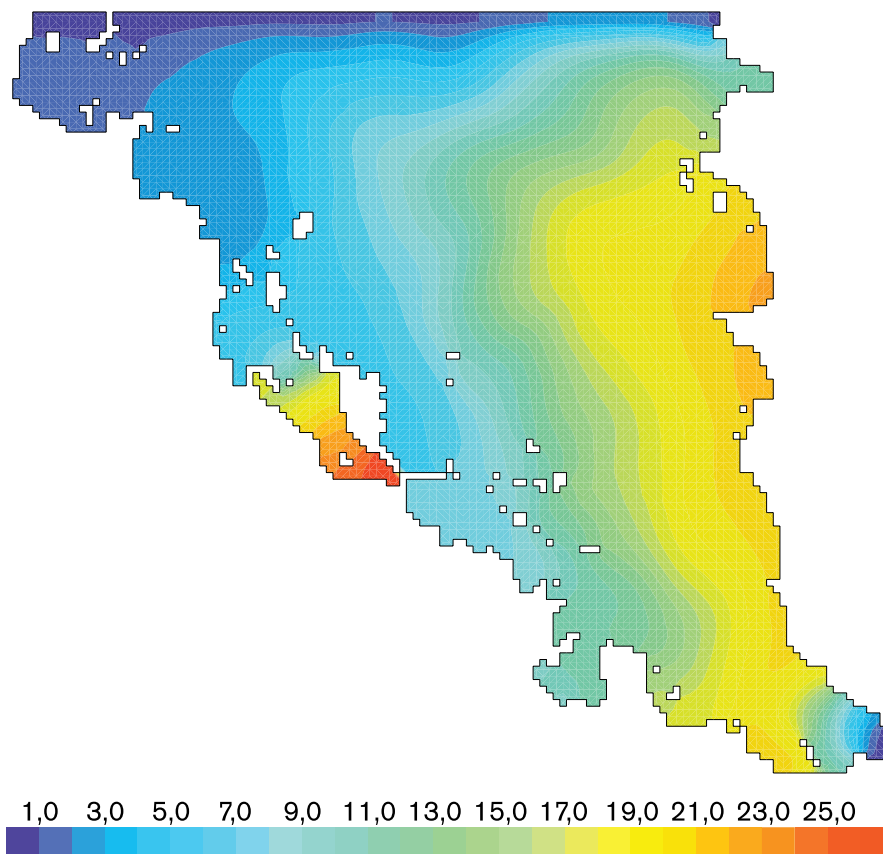
## 9.5 Transportprocesser

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.

I FUD-program 98 påvisades att en stor 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.

### **Nyvännen kunskap sedan FUD 98**

I FUD 98 konstaterades att de nya modellerna av omsättningstiden av det kustnära vattnet runt Äspö /9-30/ borde vidareutvecklas. Vattenomsättningsmodellerna för kustvatten förbättrades i SAFE-projektet /9-31, 9-32/. Nu finns en modell som täcker hela Östersjön och som ger randvillkor för de lokala kustmodellerna /9-31/. Modellens känslighet för olika klimatförändringar (temperatur och isläggning), salthaltsförändringar samt en förändring av landhöjning utvärderades för Öregrundsgrepen /9-32/, se figur 9-3. Modellen har även använts av Naturvårdsverket och Finska Meteorologiska Institutet för att studera vattenutbytet i kustvatten.



**Figur 9-3.** Exempel på resultat från vattenutbytesmodell i Öregrundsgrepen vid SFR /9-31/. Modellerad uppehållstid i dagar i Öregrundsgrepen. Området begränsas av Gräsökusten på östra sidan och i väster fastlandet vid Forsmark (området med långa uppehållstider).

I FUD-program 98 påpekas att den ytnära hydrologin är viktig för att förstå vilka transportvägar, spridnings- och spädningsprocesser som påverkar kontaminerat vatten sedan det lämnat berget. I SAFE-projektet studerades vissa interaktioner i gränsskiktet mellan berg och ytvatten /9-33/. Detta har t ex visat att vatten i lagren ovanför berget i stor utsträckning späds av vatten från omgivande berg. Dessutom späds detta vatten cirka 100 ggr med grundvattnet från ytan. Studien visade att det är möjligt att vattnet kan följa konduktiva lager i kvartära avlagringar för att strömma ut nära strandkanten. Detta kommer att följas upp i den kommande perioden och även studeras i fält.

Vid KTH har ythydrologiska studier gjorts för två sjöar i norra Uppland /9-34/ i ett projekt som finansierats av Naturvårdsverket. Fortsättningen av projektet stöds av SKB och det kan ge resultat som validerar modellstudierna /9-33/. Platsundersökningsprogrammet har identifierat flera viktiga hydrologiska studier och mätningar som bör genomföras för att underlätta biosfärsmodelleringen /9-13/. Dessa data kommer också att användas för att utveckla modellerna. Samordning sker med programmen för hydromodellering och hydrogeokemi, se avsnitt 8.2.3 respektive 8.2.21.

Modellstudier för att identifiera utströmningsområden från befintligt kartmaterial med hjälp av GIS har påbörjats. I de systemekologiska modeller som utvecklas beskrivs flödet av partiklar (som organiskt material) i ett kustområde /9-28, 9-29/, se figur 9-2. Dessa modelleringar behöver kompletteras med fältstudier och en systematisk litteraturgenomgång för att uppskatta rörelsen och flöden av partiklar i vattenmiljöer.

Vid Kalmar Högskola har överföringen av ämnen mellan växt och djurplankton /9-35/ studerats experimentellt. Arbetet kommer att sammanställas under året.

Dessutom har fältmätningar i Simpevarpsområdet påvisat kemiska signaler från transport av djupt grundvatten samt blandningsförhållanden mellan djupt och ytligt vatten /9-36/. Arbetet visar att vissa ämnen eventuellt kan spåras från djupet, vilket kommer att utvärderas i det kommande programmet i samarbete med geokemiprogrammet.

En litteratursammanställning av transportprocesser i framför allt mark håller på att tas fram. Sedimentation och liknande transportprocesser beskrivs närmare under rubriken sediment nedan.

### **Utvecklingsprogram**

De ovan beskrivna projekten kommer att fortsätta och sammanfattas till följande huvudområden:

- Fördjupad ythydrologi med modellutveckling, kartering av in- och utströmningsområden och GIS-analys, samt hydrologiska och geokemiska fältstudier. Insatsen sker i samarbete med programmen för geokemi och hydrologi. Detta kompletteras med fältdata från platsundersökningarna.
- 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 /9-5/.

## 9.6 Skogsekosystemet

Skogen är det dominerande ekosystemet vid de tilltänkta lokaliseringarna /9-25/. Det är troligt att skogen kommer att vara en recipient. Skogen har varit i fokus för flera projekt som studerat nedfallet från Tjernobyl /9-37, 9-38, 9-39/. 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, se avsnitt 9.10. De viktigaste långsiktiga processerna är ackumulation av nuklider i jordprofilen och biologiska urlakningsprocesser som förflyttar nuklider till biota. Upptransporten av radionuklider från grundvattenytan in i rötterna och växtligheten är också väsentlig. De lysimeterförsök som gjorts i BIOMOVs II /9-40/ tyder på att de biologiska processerna (rottransport, bioturbation av maskar) i marken är viktiga transportmekanismer från grundvatten till markens toppskikt.

### ***Ny vunnen kunskap sedan FUD 98***

SKB har deltagit i arbetsgruppen för skog i BIOMASS tema 3 /9-41/. Flera intressanta modeller har jämförts i denna arbetsgrupp. Den dominerande kunskapen kom från atmosfärsdeposition av cesium, men ansatser gjordes också att studera en grundvattenkälla. SSI har bedrivit forskning kring radionuklidens transport i skogen som bör tas till vara i kommande säkerhetsanalyser /9-38, 9-39/. I EU-projektet FASSET kommer också skogsmodeller att utvärderas.

SKB har initierat ett projekt vid FOI Umeå där transporten av radionuklider från grundvatten modelleras /9-42/. De faktorer som driver transporten är fotosyntes och vattenupptag. Arbetet kommer att rapporteras under 2001.

I SAFE-projektet avsåg SKB att studera skogen mera ingående, men det har varit svårt att hitta forskningsgrupper i Sverige som haft möjligt att genomföra dessa studier. De skogar som är intressantast, sumpskogar samt strandnära löv- och blandskogar, finns dock sällan representerade bland de modeller som utvecklats för att beräkna avkastningen av skog i Sverige. Det gjordes också ett försök att starta ett EU-projekt med avsikt att studera skogsmodeller och processer tillsammans med SSI. Kontakter har också tagits med SLU och Institutionen för systemekologi vid Stockholms Universitet för att vidareutveckla en befintlig skogsmodell /9-43/.

Vid diskussioner med olika experter har det framkommit att skogen som ekosystem måste differentieras. Skogsfrågan är nära kopplad till den ytnära hydrologin och utvecklingen av våtmarker. Det är framför allt skogar i sänkor som kommer att vara intressanta med avseende på effekter från ett djupförvar, dvs sumpskogar och inte t ex hållmarkstallskogar. Skogens utveckling blir därför nära kopplad till myren, se avsnitt 9.2.

En sammanställning görs för närvarande vid Botaniska Institutionen vid Stockholms Universitet av hur olika ämnen via rottransporten kommer in i växter. 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.

### ***Utvecklingsprogram***

För skogsekosystemet kvarstår ett omfattande arbete innan en tillfredställande processkunskap finns och modeller är utvecklade. Pågående arbete internationellt och hos SSI bör kunna utnyttjas som en grund för vidareutveckling. Data om skogen kommer i ett tidigt skede från platsundersökningarna, vilket kan användas för att identifiera de typer

av skog som kan bli aktuella. Vidare kommer de ythydrologiska studierna samt arbetet med myrmark att ytterligare komplettera kunskaperna för skogen och begränsa potentiella skogstyper. Följande planeras:

- Fortsatta process- och modellstudier samt inhämtning av den kunskap som finns i litteraturen och genom FASSET.
- Experiment och fältmätningar av upptag i vegetation i samarbete med geokemi-programmet.
- GIS-analys av korrelation mellan potentiella utströmningsområden och typ av vegetation kompletterat med data från platsundersökningar.

## 9.7 Myrmark

Myrar och våtmarker är viktiga och troligen de mest sannolika recipienterna vid de tilltänkta lokaliseringarna, speciellt i framtiden. I SR 97 identifierades myrar som det typekosystem som ger den potentiellt högsta dosen till människan, för många radionuklider högre än de doser som kan erhållas 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, t ex utdikning, uppodling eller eldning av torv.

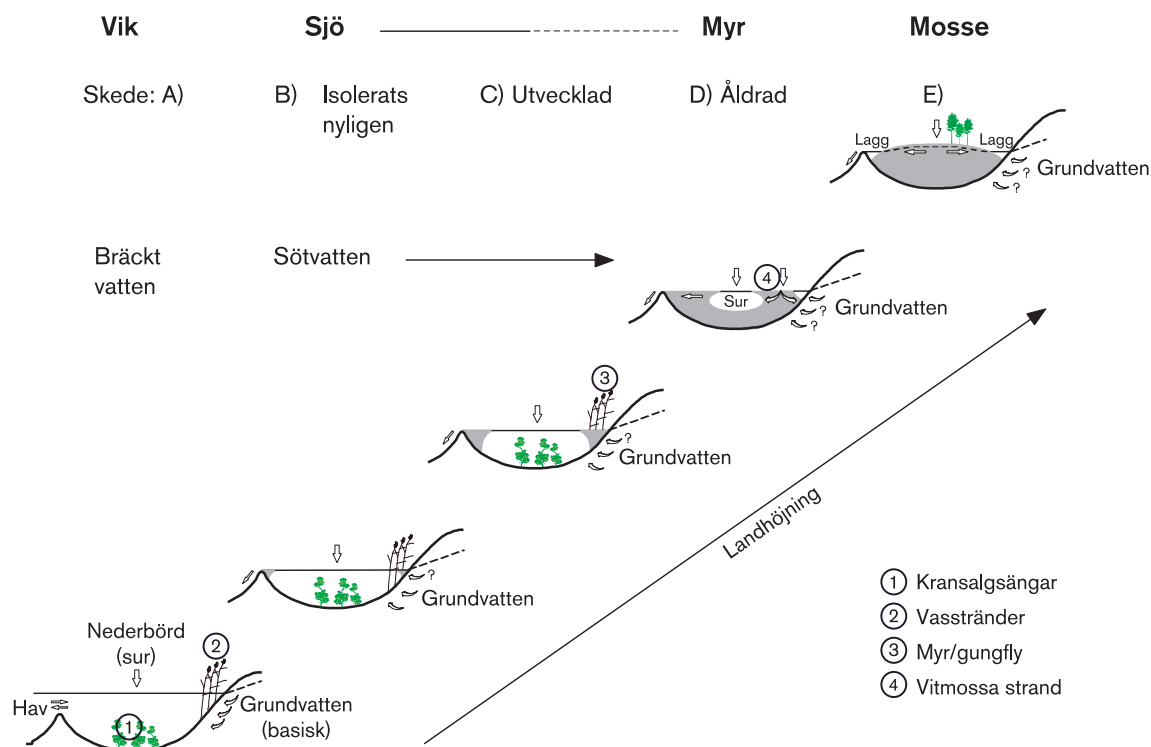
I SR 97 och i SAFE konstateras att myrar är vanliga i många områden, de är en trolig utströmningspunkt från geosfären och ett troligt resultat av den naturliga framtida utvecklingen av biosfären efter landhöjningen i ett kustområde. Dessutom har det varit vanligt att dika ut våtmarker för att erhålla jordbruksmark i delar av norra Uppland /9-44/ 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.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

I anslutning till SAFE-projektet har utvecklingen från havsområde till sjö och sedan myr beskrivits /9-27, 9-45 till 9-47/, se figur 9-4. Vidare har borrhningar med datering gjorts i norra Uppland /9-48/ samt i Värmland /9-49/ för att bestämma isoleringstider och tillväxthastigheter, bl a för att rekonstruera klimatförändringar, se avsnitt 9.9. Ytterligare information sammanställs för tillfället av de drygt 400 borrhningarna i norra Uppland av Limnologiska avdelningen, Uppsala Universitet och Umeå Universitet.

FOI:s arbete med skogsmodellen /9-42/ inkluderar även en utveckling och modell över kolets transport genom en myr innan skogen bildas.



**Figur 9-4.** Schematisk beskrivning av utveckling från avsnörd havsvik till myr /9-46/. Sifforna representerar olika viktiga komponenter av ekosystemen.

### Utvecklingsprogram

Det viktigaste arbetet avser att fördjupa kunskaperna om myrmarker med en processbeskrivning samt att vidareutveckla dagens modeller. Ytterligare kunskaper behövs om tillväxthastigheter, bildningsprocessen samt människans utnyttjande av våtmarker. En stor del av denna information kan inhämtas från litteraturen, pågående studier samt de data som samlas in under platsundersökningar. Samordning sker med studierna av skogsmarks-, sediment- och transportprocesser. Vidare kommer FASSET att sammanställa viktig fauna och flora som kan påverkas i myrar. Huvudpunkterna i kommande arbete är:

- Beskrivning av viktiga processer som en litteratursammanställning.
- Vidarutveckling av dagens modeller.
- Studier av myrars och våtmarkers hydrologi.
- Fältstudier i myrar som existerar i regioner för lokalisering för att bestämma tillväxthastigheter, isoleringstidpunkt m fl parametrar, men också för att ge information om långtidsutvecklingen. Data kommer huvudsakligen att produceras vid platsundersökningarna.

## 9.8 Sediment

Sedimenten i hav, floder och sjöar utgör viktiga områden som påverkar transporten av radionuklider till biota. I många potentiella utströmningsområden kommer radionukliderna att passera ett sedimentlager. Sedimentets genomsläpplighet och adsorptionen påverkar spridnings- och spädningsmönstret. I gränsskiktet mellan sediment och vatten sker en markant förändring i redoxförhållanden, salthalt och biologisk aktivitet /9-50/ som kan påverka radionuklidflödet kraftigt. Kortsiktigt kommer dessa processer troligen att minska utflödet och ge lägre doser. Långsiktigt kan däremot stora mängder 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 t ex via fisk till människan.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

I anslutning till SAFE-projektet har sedimentationsmiljön i norra Uppland modellerats från cirka 10 000 år bakåt i tiden till 5 000 år in i framtiden /9-51/. De styrande parametrarna var öppenheten av havet vilket angett vågerosionens kraft samt landhöjningsprocessen som styr djupet och uppkomsten av skyddande öar och skärgårdar. Studien har visat oväntat god överstämmelse med den kvartärgeologiska kartan av området. För närvarande görs försök att förutsäga sedimentlagrens tjocklek genom att utveckla denna modell. För att kalibrera modellen har nya fältdata insamlats /9-48/ samt äldre opublicerade data sammanställs /9-52/, se avsnitt 9.7.

Kunskapen om processerna i och på sedimenten har sammanställts i två litteraturstudier /9-50, 9-53/. De beskriver processer i framförallt marin- och brackvattenmiljö respektive metoder på solbelysta sötvattensediment. Materialet är underlag för ett experimentellt projekt avseende transporten av radionuklider genom en sedimentprofil.

Utvecklingen för avsnörda havsvikar, sjöar och myrmarker vilket påverkar sedimentbildning har beskrivits /9-45, 9-46/. Några av de biologiska processerna som påverkar sedimentbildning har beskrivits och modellerats för kustområden /9-28, 9-29/ och sjöar /9-54/. De hydrologiska processerna har modellerats i SAFE-projektet /9-33/ samt mätts för två sjöar i norra Uppland av KTH /9-34/.

Ett projekt har startats vid Geologiska Institutionen vid Stockholms Universitet för att studera utbredningen av och orsaker till indikationer på kraftiga erosionstillfällen för cirka 8 000 år sedan på Östersjöns botten. Insatserna samordnas med geologiprogrammet. Omsättningen, transporten och sedimentationen av Cs-137 efter Tjernobyl har följts längs Östersjökusten /9-55/ och beräknas rapporteras 2001. Studien visar att den kustnära sedimentationen i djuphålorna kan vara avsevärt högre än tidigare uppskattningar. Dessutom sker transporter från havet och anrikning in i områden som inte ursprungligen kontaminerats, t ex Stockholms skärgård.

### ***Utvecklingsprogram***

De påbörjade projekten ovan kommer att fortsätta. En större insats kommer att starta med att experimentellt studera kemiska, fysiska och biologiska processer som påverkar radionuklider i sediment från kusten samt eventuellt insjöar. Detta kommer att kompletteras med hydrologiska modeller för att beskriva grundvattnets väg genom sedimentet samt fältmätningar av ämnen som kan ha transporterats med djupt grundvatten. En del av arbetet planeras ske i samarbete med Posiva. Platsundersökningarna förväntas ge

nödvändiga data över fördelningen av sediment och ackumulationshastigheter. Samarbetet sker också med de hydrologiska, geokemiska och geologiska programmen och samordnas med insatser i myrmark och transportprocesser. Några viktiga områden som kommer att studeras är:

- Experimentellt arbete med att studera kemiska, fysiska och biologiska processer i det gränsskikt som sediment bildar.
- Fortsatt modellering av spridningsprocesser under och genom sediment.
- Modellering av omlagring och ackumulation av sediment, kompletterat med fältdata.

## 9.9 Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt

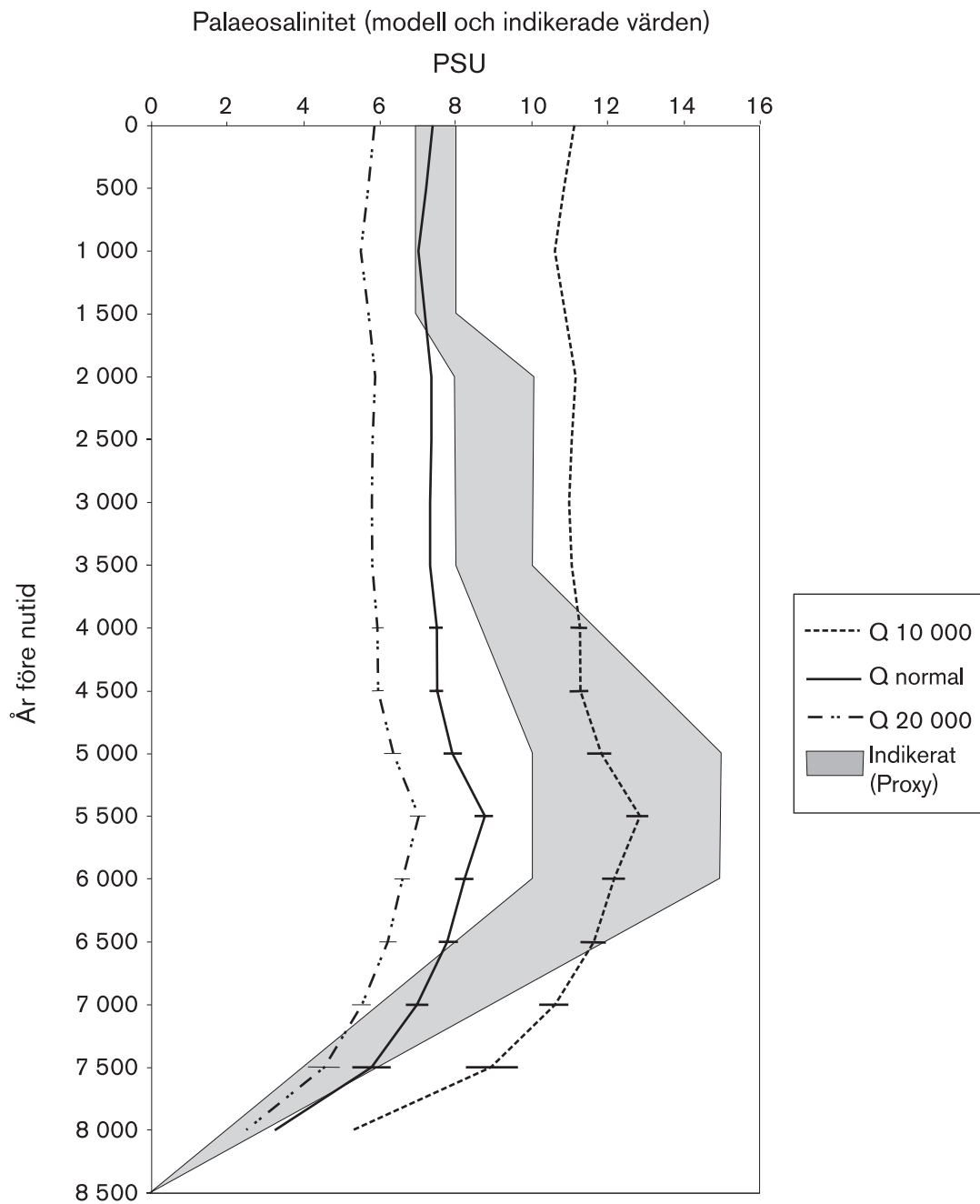
Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Salthalten påverkar vilka ekosystem som kommer att dominera i Östersjön och radionuklidernas speciering. Dessa faktorer är också viktiga randvillkor för transportmodellerna i geosfären. Strandförskjutningen påverkar 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 /9-56, 9-57/ och för SR 97 studerades strandlinjeförskjutningen under flera glaciationsperioder /9-58/. Strandlinjeförskjutningen kan påverkas av en eventuell växthuseffekt, vilket förväntas ge en stigande havsyta. De närmaste 100 åren kan havsyntans nivå komma att stiga cirka 0,4 meter enligt en sammanställning /9-59/. Det innebär att strandförskjutningen avstannar under en tidsperiod, vilket även har uppmätts /9-60/. På längre sikt kommer en eventuell framtida glaciation återigen att binda vatten i glaciärer vilket ger en sänkning av havsnivån omkring 100 meter /9-58, 9-61, 9-62/. Detta påverkar utströmningsområden vid kusten vilket återverkar på miljön runt djupförvaret. Det påverkar också salthalten i Östersjön samt biosfärens sammansättning.

### **Ny vunnen kunskap sedan FUD 98**

SKB har initierat ett samarbete mellan Kvartärgeologiska Institutionen, Stockholms Universitet, Oceanografiska Institutionen vid Göteborgs Universitet och SMHI där kunskaperna om Östersjöns salthalt sedan istiden har jämförts med en oceanografisk modell som beskriver vattenutbytet /9-63/. Studien visar att den högsta salthalten i Östersjön under Litorinatiden snarare har varit 10–15 promille än tidigare antagna drygt 20 promille, se figur 9-5. Den visar också att förändringar i tröskeldjupen i sunden mellan det danska fastlandet och Sverige inte ensamt kan förklara Östersjöns olika stadier av salthalt, utan att det krävs förändringar av sötvattenavrinningen till Östersjön. Perioderna med höga salthalter i Östersjön sammanfaller med perioder som kan ha varit torrare. Denna modell har också använts för att förutsäga framtida salthalter i Östersjön beroende på olika klimatutvecklingar och strandlinjeförskjutningar /9-64/.





**Figur 9-5.** Salthaltsutvecklingen i Östersjön efter istiden jämfört med modellförutsägelser /9-63/. Grå yta visar uppskattningar av salthalt från fossilfynd, linjer visar modellerade salthalter beroende på sötvattenstillflödet till Östersjön ( $Q \text{ m}^3/\text{år}$ ), staplar på linjer visar osäkerheter beroende på antaganden om tröskeldjup vid de olika sunden mellan Sverige och Danmark.

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. En uppskattning av tänkbara variationer av grundvattenbildningen i Äspöområdet har gjorts av SMHI /9-65/. Dessa resultat kan sedan kopplas till den klimatutveckling som skett under holocen för att rekonstruera grundvattenbildningen och förutsäga vilken framtida utveckling den kan få. En sammanställning av klimatutvecklingen de senaste 200 000 åren har gjorts /9-66/. De största osäkerheterna gäller variationerna i nederbörden och avrinningen. Därför initierades ett projekt som studerar och daterar förekomsten av horisonter i torvmossor som har en avvikande humifieringsgrad som anses bero på torrperioder /9-49, 9-63/. Vidare gjordes en förstudie av möjligheten att använda droppstenar från skandinaviska kalkstensgrottor för att spåra temperatur- och nederbördsförändringar med en metod som tidigare använts i tropiska områden /9-67/. De preliminära resultaten och resultat från andra svenska grottor visar att det kan vara möjligt att spåra förändringar de senaste drygt 100 000 åren.

Ytterligare information om landhöjningsförloppet i Uppland har erhållits från fältstudier /9-48/, sammanställning av opublicerade data, se avsnitten 9.7 respektive 9.8, samt modelleringar /9-47/.

För SR 97 gjordes en sammanställning av förväntade förändringar i biosfären under klimatcykeln /9-68/.

### **Utvecklingsprogram**

De ovannämnda påbörjade projekten kommer att fortsätta. 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 yttnära ekosystemen. Delar av denna kunskap produceras i flera nationella och internationella projekt, bl a när det gäller kortsiktiga klimatförändringar i SWECLIM /9-69/ och det huvudsakliga arbetet är att följa resultaten som erhålls från dessa. Klimatfrågorna är nära kopplade till geosfärs- och geokemiprogrammet samt scenarioutvecklingen. Platsundersökningarna kommer också att producera data, framför allt när det gäller landhöjningsförloppet, men också lokalklimatets variation. De huvudfrågor som studeras i kommande forskningsprogram är:

- Klimatförändringar i Skandinavien under mellanistider i form av en sammanställning av information från genomförda studier.
- Fältmätningar som ger information om avrinningens långsiktiga förändringar.
- Kunskapssammanställning om permafrost och tundrans betydelse för radionuklidtransport i biosfären.
- Följa diskussionen om växthuseffekten.

## 9.10 Internationellt arbete

I det internationella arbete inom bl a IAEA, EU, IRPA 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.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

Det internationella projektet BIOMASS i IAEA:s regi avslutades hösten 2000 och kommer att producera flera rapporter där SKB har deltagit aktivt i arbetet i Tema 1 (förvar) och Tema 3 (skogs- och fruktgruppen).

SKB deltar i ett treårigt EU-projekt inom femte ramprogrammet, FASSET, som startade i november 2000. FASSET avser sammanställa kunskaperna om radiologiska effekter på miljön, dvs flora och fauna. Syftet är att föreslå ett ramverk för hur sådana frågor kan hanteras av industri och myndigheter. 14 organisationer deltar i arbetet med representanter från strålskyddsmyndigheter och nationella strålskyddsforskningsorgan från flera länder. SSI är koordinator för projektet. SKB deltar tillsammans med Systemekologiska Institutionen, Stockholms Universitet, i de arbetsgrupper som studerar spridningsmodeller i olika ekosystem, biologiska effekter samt själva ramverket. Detta arbete förväntas mynna ut i bättre underlag för att hantera effekter på miljön, vilket SSI:s föreskrifter begär.

SKB stöder ett projekt tillsammans med KSU som syftar till att belysa ett förslag till förändrad syn på ICRP rekommendationer /9-70/. I samarbete med Nagra och Enresa diskuteras en sammanställning av synen på biosfären i dessa organisationer. Samarbete diskuteras med Posiva inom vissa biosfärsområden, se avnitt 9.8.

Förutom ovanstående har SKB presenterat material om biosfärsarbetet vid flera symposier.

### ***Utvecklingsprogram***

Förutom att följa och aktivt delta i de olika organisationernas diskussioner är målet att publicera erhållna resultat i internationella tidskrifter. SKB:s engagemang i FASSET kommer också att vara en viktig aktivitet.

Följande huvudaktiviteter planeras:

- Aktivt arbete inom EU-projektet FASSET.
- 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.

## 9.11 Säkerhetsanalys

Redovisningen av biosfären i SKB:s säkerhetsanalyser har utvecklats från en pessimistisk doskonverteringsfaktor för en brunn till en ökad realism. Myndigheternas krav har också ökat för biosfären.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

SKB har utfört tre säkerhetsanalyser under den gångna perioden där biosfären behandlats mer ingående än i tidigare analyser. I SR 97 och SFL 3-5 användes för första gången plats-specifika biosfärer. En av de största osäkerheterna i dosberäkningarna härrörde från biosfärparametrar /9-17, 9-24, 9-26, 9-71/. I säkerhetsanalysen för SFR som rapporterades i juli 2001 används en tidsberoende biosfär. Alternativa verktyg testas och plats-specifika data används i betydligt större utsträckning än i tidigare analyser /9-18, 9-27/.

För säkerhetsanalyserna för SR 97 och SFL 3-5 har det inte varit möjligt att utnyttja all den kunskap som redovisas ovan, eftersom arbetet med säkerhetsanalysen och utvecklingen av förståelsen har skett parallellt. Det betyder att bl a nya insikter om land-ekosystem inte nyttjats fullt ut. I SAFE har möjligheterna varit större att komplettera med bättre förståelse och plats-specifika data, men synpunkterna från granskningen av de föregående analyserna har inte kunnat tas hänsyn till fullt ut då största delen av SAFE redan genomförts då granskningsresultatet blev tillgängligt. SAFE är den mest kompletta säkerhetsanalysen när det gäller biosfären och bedöms bli en god grund för kommande analyser.

Arbetet med att hantera effekter på miljön har påbörjats genom deltagande i EU-projektet FASSET, se avsnitt 9.10 samt genom att starta ett projekt vid Systemekologiska Institutionen vid Stockholms Universitet som syftar till att sammanställa erfarenheter från ekotoxikologi och skydd av miljön från toxiska ämnen.

Faktaunderlaget som behövs för säkerhetsanalysen finns redovisat ovan under de olika delprogrammen och sammanställs i rapporterna för dosmodellerna /9-17, 9-18, 9-24/ samt i den sammanfattande rapporten för biosfärsdelen i SAFE /9-27/. Dessa rapporter redovisar också statusen för beräkningsverktygen.

Under denna period har också SSI gett ut nya föreskrifter /9-5/. SKI har gett ut en remiss på föreskrifter för slutförvaring av radioaktivt avfall. SKB och SSI har påbörjat en diskussion för att klargöra hur riskmättet i SSI:s föreskrifter ska tillämpas.

Finland /9-72/, Japan /9-73/ och USA /9-19, 9-74/ har också under perioden redovisat säkerhetsanalyser där biosfärens roll delvis belyses.

### ***Utvecklingsprogram***

Erfarenheterna från säkerhetsanalyser som SKB utfört kommer att utvärderas för att användas till att utveckla moderna redskap för nästa säkerhetsanalys. En av de centrala frågorna är hur riskmättet ska tillämpas enligt SSI:s föreskrifter och hur verktygen och modellerna ska anpassas därefter. Verktygen behöver också utvecklas för att effektivt och flexibelt kunna hantera de nya processer som identifierats samt de plats-specifika data som kommer att produceras, se avsnitt 9.4.

Metoder och kunskaper om konsekvenserna för miljön av radionuklider kommer att utvecklas i nära anknytning till de resultat som FASSET producerar.

## 9.12 Platsundersökningsprogram

En del av osäkerheterna i biosfären förorsakas av bristande tillgång och kvalitet på data. För att stödja utvecklingen av modeller samt ge plats-specifika data till säkerhetsanalyserna behöver data samlas in vid platsundersökningar. Till skillnad från andra ämnesområden har SKB relativt liten erfarenhet av att samla in biosfärdata. Därför måste metoder utvecklas samtidigt som tillgängliga kunskaper och resurser sammanställs. I FUD 98 angavs viktiga områden som behöver fördjupas för platsundersökningarna i biosfären, men inget eget program för detta angavs.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

Platsundersökningsprogrammet som kan komma att starta under 2002 kommer att vara en av de mest omfattande datainsamlingar som har utförts i Sverige. En översikt av omfattningen framgår i underlaget för Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet /9-75, 9-76/. För att tillgodose behovet av data och förståelse till säkerhetsanalyserna och biosfärmodellerna krävs en insamling av data från de närliggande ekosystemen. I /9-13/ anges variabler och parametrar som bedöms vara viktiga. En samordning har gjorts med geofärsprogrammet för att finna gemensamma behov av data för randvillkor, underlag för miljökonsekvensbeskrivningen samt underlag för framtida övervakningsprogram. Dessutom har variabler identifierats som är av värde för planeringen av platsundersökningsprogrammet för att t ex minska miljöstörningar. Olika sammanställningar har sedan gjorts av befintliga data och metoder inom olika fält, t ex meteorologi, oceanografi, hydrologi /9-77/, befintlig information om jordbruk, skogsbruk, befolkning m m /9-78/, metoder för att studera sjöar och vattendrag /9-79, 9-80/ och andra biologiska metoder /9-81/.

Ett första försök att sammanställa och utvärdera befintliga data har gjorts för de två exemplen Forsmark och Simpevarpsområdet /9-82, 9-83/ och kommer att användas som underlag till de plats-specifika programmen. För detta arbete har bl a utvecklingen av en GIS-applikation för Uppland använts /9-84/.

För SAFE-projektet har biosfärdata kompletterats med fältundersökningar /9-85/ samt litteratursammanställningar av befintliga data /9-27, 9-28, 9-31, 9-47, 9-51, 9-84, 9-86, 9-87/ som ett underlag för platsundersökningsprogrammet.

### ***Utvecklingsprogram***

Under den kommande perioden kommer metodbeskrivningar och detaljering av programmet att göras i den nya platsorganisationen /9-76/. Eftersom modellerna och kunskaperna inom biosfären kommer att vidareutvecklas är ett nära samarbete mellan forskningen, säkerhetsanalysen och platsundersökningarna nödvändig. Nya metoder för platsundersökningarna kommer att behöva utvecklas och utvärderas, t ex produktionsmätningar. Resultaten från platsundersökningen förväntas dessutom ge frågor som kan kräva forskningsinsatser. Vidare behöver metoder för analys av erhållna data utvecklas och testas, t ex analytiska GIS-applikationer, statistisk utvärdering och dynamisk modellering.

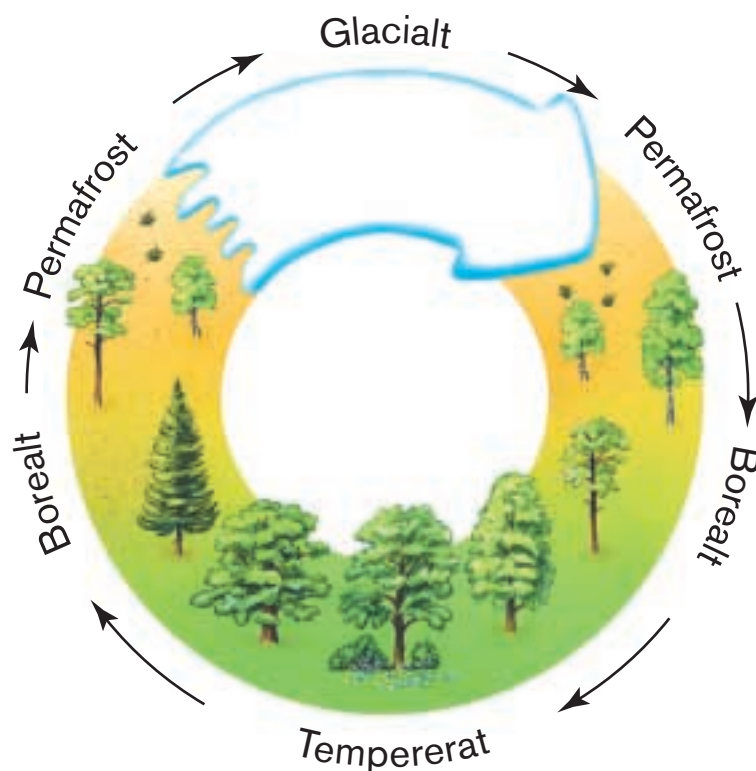


## 10 Klimatutveckling

Klimatförändringar av sådan omfattning att de påverkar framför allt biosfären, men även berggrunden ända ned till förvarsdjup, kommer med stor säkerhet att inträffa i framtiden. Sådana förändringar måste därmed inkluderas i en analys av förvarets långsiktiga säkerhet. I SR 97 gjordes detta i ett särskilt klimatscenario.

### **Slutsatser i SR 97 och dess granskning**

Klimatscenariot i SR 97 utgick från tre förväntade framtida klimattillstånd: Tempererat/borealt tillstånd, permafrosttillstånd och glacialt tillstånd, se figur 10-1. Inom varje tillstånd beskrevs förändringar i förvarets omgivning samt hur de kan påverka förvarets utveckling. Det är idag inte möjligt att förutsäga klimatförändringar. Vi vet dock att utvecklingen följer cykliska förlopp. Beskrivningar av förhållanden inom de olika klimattillstånden är grunden för analysen av klimatförändringarnas betydelse för djupförvaret.



*Fig 10-1. Klimatrelaterade förändringar kan ses som en cyklisk utveckling med en successiv övergång mellan olika klimattillstånd.*

SKB:s slutsats från genomgången var att klimatrelaterade förändringar inte bör påverka förvarets säkerhet. Samtidigt identifierades flera områden som behöver studeras närmare:

- Möjliga variationer av det skandinaviska klimatet – i syfte att förbättra biosfärsbeskrivningarna samt som underlag för studier av permafrost- och isutveckling.
- Utveckling av permafrost i Skandinavien samt de hydrologiska förhållandena vid permafrost.
- Sambandet mellan islast och påkänningar/rörelser i berggrunden; både kopplingen mellan hydraulisk och mekanisk utveckling och de storskaliga tektoniska förändringarna.
- Blandning av vatten med olika ursprung i bergets system av sprickor och porer.
- Kapselns hållfasthet, där beräkningar behöver förfinas med användning av mer realistiska materialdata.
- Bufferterrosion vid extremt jonfattiga grundvattensammansättningar.
- Återfyllningens utveckling och funktion vid klimatiförändringar.

Flera av dessa frågor behandlas i processbeskrivningarna i kapitlen 5 till 8. Frågan om det framtida klimatets påverkan på biosfären behandlas i kapitel 9. Nedan behandlas frågeställningar som inte till fullo täckts i dessa kapitel.

Granskarna av SR 97 ansåg bl a att alternativa klimatutvecklingar borde analyserats utförligare i SR 97.

### **Klimatutvecklingen i ett 100 000-årigt perspektiv**

Nedtryckningen av jordskorpan liksom landhöjningsförloppet efter det senaste glaciala maximumet är relativt väl kända. Kunskapen om förloppet under en hel glacial cykel är däremot begränsad. Det gäller både islastens storlek och de egenskaper hos litosfären och det viskösa medium litosfären antas vila på som påverkar nedtryckningens belopp och hastighet. Kustlinjens läge är viktig både för biosfärsbeskrivning, geohydrologi och grundvattensammansättning. Landhöjningsförloppet bör därför utredas ytterligare.

### **Tempererat/borealt tillstånd**

Kustlinjens läge är en viktig parameter för att uppskatta de hydrologiska randvillkoren för djupförvaret och för att bedöma salthalten. Behovet av forskning runt landhöjning finns därför också för att få en god förståelse för förhållandena under det temperade/boreala tillståndet. Det gäller inte minst beskrivning av ekosystem och biosfär, se vidare kapitel 9.

Klimatvariationer till följd av växthuseffekten bedöms idag täckas in av de variationer som SKB arbetar med inom det tempererade/boreala tillståndet.

### **Permafrost**

För att bedöma förekomst av permafrost i Sverige krävs bättre kunskap om klimatförhållandena under en glacial cykel. Även i detta sammanhang är kustlinjens läge viktigt.



## **Glacialt tillstånd**

I SR 97 presenteras en konceptuell modell som beskriver de hydrauliska förhållandena under en inlandsis. Det finns flera osäkerheter i modellen som bör utredas närmare, exempelvis:

- Förekomst av vätskeformigt vatten i gränsskiktet mellan isen och dess underlag.
- Tillförsel och betydelse av smältvatten från isens yta.
- Variation av flöden och tryck i tid och rum.

Kopplingen mellan hydrauliska och mekaniska processer i samband med glaciationer behöver också utredas närmare liksom spänningstillståndet under isen och dess förändring i relation till islasten och isens utbredning samt dess betydelse för förekomsten av jordskalv.

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I FUD 98 beskrivs det paleohydrogeologiska program som inleddes 1994 /10-1/. Programmets syfte var att:

- Identifiera och skapa en förståelse för de processer orsakade av framtida klimatförändringar som kan påverka funktionen av ett djupförvar.
- Skapa ett underlag för funktions- och säkerhetsanalyser av förvaret i ett långt tidsperspektiv.

Programmet innehöll modellering av glaciationer, mekaniska, hydrogeologiska och hydrokemiska aspekter samt kopplade effekter. Det avslutades och avrapporterades i samband med genomförandet av säkerhetsanalysen SR 97 /10-2/.

De största förändringarna av betydelse för förvarets säkerhet som kan förväntas i ett 100 000-årigt perspektiv är med stor sannolikhet associerade med klimatförändringar och uppkomsten av inlandsisar. De frågor som speciellt lyftes fram i FUD 98 var permafrost, påverkan på grundvattenkemin, transport och kopplade effekter. I sin utvärdering av FUD 98 påpekar SKI att samtliga frågor SKB behandlar inom det paleohydrogeologiska programmet är relevanta och bör ingå i SKB:s fortsatta arbete samt att SKB behöver redovisa hur man avser att integrera frågorna i verksamheten. Vidare konstaterar SKI att mycket av kunskapsuppbyggnaden sker internationellt och att detta är bra, men att det är viktigt att frågor som är relevanta för de svenska förhållandena bör tas upp inom ramen för SKB:s egna projekt.

## **Nyvetenskap sedan SR 97 och FUD 98**

Vid genomförandet av SR 97 sammanställdes kunskapen inom området och integrerades med övrig kunskap. Resultat från de projekt som omnämns i FUD 98 ingår till största delen i SR 97. Efter SR 97 har arbetet huvudsakligen bestått i planering av fortsatt arbete med hänsyn till de synpunkter som lämnats på säkerhetsanalysen och på FUD 98. Forskning vad gäller landhöjning samt storskaliga tektoniska rörelser och jordskalv har pågått, se vidare avsnitt 8.2.7.

De båda EU-projekt som nämns i FUD 98, EQUIP (Evidence from QUaternary Infills for Palaeohydrology) och PAGEPA (PAleohydrogeology and GEoforecasting for Performance Assessment) har avslutats. Målet för EQUIP var att testa olika metoder att undersöka sprickmineral och deras användbarhet för att spåra tidigare hydrokemiska och hydrologiska förhållanden. Resultatet var förbättrade mät- och analysmetoder, en medvetenhet om vad som kan åstadkommas, samt att det finns uppenbara osäkerheter i tolkningarna av gångna tiders förhållanden /10-3/.

Inom PAGEPA användes en glaciationsmodell, olika hydrologiska modeller och en geokemisk datormodell för att simulera hur grundvattnets sammansättning kan ha varierat under Weichsel-glaciationen. Genom att använda en kedja av datormodeller kan scenarier som beskriver grundvattensammansättningens utveckling över tiden skapas. Modellresultat i kombination med fältdata ger underlag för att gränssätta de variationer som kan förväntas under en glacial cykel /10-4/.

## **Forskningsprogram**

### **Klimatutvecklingen i ett 100 000-årigt perspektiv**

De empiriska studier av landhöjningsförloppet som låg till grund för scenariebeskrivningen i SR 97 avslutas under 2001. Fortsatta studier planeras för närvarande. Arbetet är integrerat med studier av den storskaliga tektoniska utvecklingen i den skandinaviska skölden, se avsnitt 8.2.7.

En inventering av det olika geologiska och biologiska arkiv över gångna tiders klimat som finns tillgängliga i Skandinavien planeras, se avsnitt 9.9.

### **Tempererat/borealt tillstånd**

All planerad forskning som rör enbart detta klimattillstånd gäller biosfären, se kapitel 9.

### **Permafrost**

Utveckling av permafrost och dess betydelse för djupförvarets säkerhet kommer enligt planerna att studeras i samarbete med Finland, Kanada och Storbritannien. Projektet planeras inkludera kartläggning av nuvarande områden med permafrost, modellberäkningar samt fältstudier på en plats i Kanada.

### **Glacialt tillstånd**

Inom EU-projektet BENCHPAR, där SKB deltar, studeras kopplingen mellan hydrauliska och mekaniska processer samt deras inverkan på förhållandena i närområdet av en deponerad kapsel. Olika modeller används för att bygga upp förståelsen av processerna samt för att kvantifiera deras effekter. Utveckling av den ovan nämnda konceptuella modellen, som beskriver de hydrauliska förhållandena under en inlandsis, planeras för närvarande.

## 11 Naturliga analogier

Analysen av den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar förlitar sig främst på resultat från laboratorieförsök och mätningar i fält. Mätresultaten används för modellberäkningar av t ex hur radionuklider löser sig i grundvattnet. Modeller och antaganden byggs sedan under med ytterligare experiment från laboratorium eller in situ. Forskningen i Äspö-laboratoriet ger många exempel på det senare. Som ett komplement till experiment i laboratorium och i fält studeras även sk naturliga analogier, se figur 11-1. Fördelarna med naturliga analogier är att de ger en möjlighet att undersöka processer som pågått under mycket längre tider än vad som normalt kan följas i ett försök i laboratorium eller i fält. Betydelsen av kinetiska begränsningar blir tydligare och effekterna av sammansatta och kopplade processer kan studeras. Analogierna ger som regel tider som är jämförbara med förvarets förväntade livslängd, men nackdelarna är bristen på kontroll. ”Experimentet” kan inte arrangeras. Det är alltid svårt att finna en tillräckligt bra analogi och det finns sällan tydliga gränsvärden. Därför är det ovanligt att mätdata från naturliga analogier används direkt i analyser av långsiktig säkerhet. I de fall där så har skett har det ofta varit i brist på andra mätningar. Däremot är det inte ovanligt att modeller i säkerhetsanalysen prövas på naturliga analogier för att se att de fungerar som avsett, se tabell 11-1. SKB har deltagit i hälften av de uppräknade studierna.

SKB har medverkat i en översikt över alla de naturliga analogier som studerats på olika håll i världen, liksom på hur de använts i olika sammanhang /11-1/.

Naturliga analogier utnyttjades mycket sparsamt i säkerhetsanalysen SR 97. Planerna för naturliga analogier i kommande analyser kommer att redovisas i den Metodrapport som skrivs inför dessa, se vidare avsnitt 2.1.1.



*Figur 11-1. Naturliga analogier till bränslet, kapseln och bufferten finns över hela världen.*

**Tabell 11-1. Exempel på naturliga analogier som har använts för att studera processer av betydelse för säkerhetsanalyser av slutförvar.**

Analogi, land	Processer och scenarier	Data har använts i säkerhetsanalyser	Modeller har använts i säkerhetsanalyser
<b>Uran</b>			
Alligator Rivers, Australien	Radionuklidtransport och fördröjning (speciellt för uran). Grundvattenflöde och transport av lösta ämnen. Transport med kolloider.		
Poços de Caldas, Brasilien	Utvecklingen av en redoxfront. Transport med kolloider. Löslighet och medfällning av radionuklider.	Fältdata har använts för att visa att kollider endast har begränsad betydelse (SKB 91) /11-2/. Fältdata har använts till att sätta gränser för utvecklingen av en redoxfront (KRISTALLIN-I) /11-3/.	Test av modeller som behövs för att beräkna lösligheter av radionuklider (KRISTALLIN-i) /11-3/.
Cigar Lake, Kanada	Bränsleupplösning. Radiolys i grundvatten med urandioxid. Processer i en lerbuffert. Radionuklidretention. Inverkan av kolloider och organiska ämnen på transport av radionuklider.	Observationerna har använts för att visa att beräkningarna av radiolytisk oxidation är konservativa (SKB 91, SR 97) /11-2, 11-4/. Har även använts för att visa att antaganden om hastighet för bränsleupplösning varit konservativa (TILA 99) /11-5/. Löslighet av uran i djupa grundvatten /11-6/.	Test av modeller som behövs för att beräkna lösligheter av radionuklider (SKB 91) /11-2/.
Palmottu, Finland	Geokemisk kontroll av redoxförhållanden med uranmineral. Geokemiska spår av glacialt smältvatten och permafrost. Inverkan av kolloider på transport av radionuklider. Mikrobernas inverkan på geokemin. Matrisdiffusion.	Profiler från matrisdiffusion.	Har använts som exempel på att matrisdiffusion är en process i naturen (SR 97) /11-4/.
Oklo, Gabon	Bildning av uransilikat. Inverkan av radiolys på använt bränsle. Frigörelse av radionuklider. Löslighet hos radionuklider. Geokemiska redoxreaktioner. Mikrobernas inverkan.		Test av modeller som behövs för att beräkna lösligheter av radionuklider (SR 97, KRISTALLIN-I) /11-2, 11-4, 11-7/. Test av modellen M3 som används för att analysera blandning av grundvatten (SR 97) /11-4, 11-8/.

<b>Analogi, land</b>	<b>Processer och scenarier</b>	<b>Data har använts i säkerhetsanalyser</b>	<b>Modeller har använts i säkerhetsanalyser</b>
Peña Blanca, Mexico	Frigörelse och transport av uran under omättade förhållanden. Den relativa betydelsen av transport i bergets matris.	Identifierade sekundära faser av betydelse för frigörelse av uran.	Beräkningar av radionuklidfrigörelse (Förvaret i Yucca Mountain) /11-9/. Transport av upplösta grundämnen under omättade förhållanden (Förvaret i Yucca Mountain) /11-9/.
Shinkolobwe, Zaire	Oxidation av uran. Bildning av sekundära uranfaser.	Omfattande lista på uranylmineral.	
El Berrocal, Spanien	Transport och retention av radionuklider (speciellt uran). Matrisdiffusion. Löslighet hos radionuklider. Grundvattenflöde och transport.		Test av modeller som behövs för att beräkna lösligheter av radionuklider /11-10/.
Tono, Japan	Transport och retention av radionuklider (speciellt uran). Inverkan av tektonisk aktivitet (jordbävning) på uranmalm.		
Marysvale, Utah, USA	Transport och retention av radionuklider.		
<b>Koppar</b> Skeppet Kronan, Sverige	Kopparkorrosion /11-11/. Diffusion av kopparjoner i lera /11-11/.	Gränsvärde för korrosionshastighet.	Kopparkorrosion (TVO 92) /11-12/.
Åskledarplattor, Sverige	Gropfrätning i koppar /11-13/.	Gränsvärde för gropfrätningens faktor (KBS-3) /11-14/.	
Keweenaw, Michigan, USA	Koppars livslängd /11-15/.		
Hyrkkölä, Finland	Kopparstabilitet /11-16/.	Kopparkapselns livslängd utgående från förekomst av nativ koppar (TILA 99) /11-5/.	
Littleham Cove, Storbritannien	Kopparkorrosion /11-17/.		
<b>Järn</b> Bühl, Tyskland	Järnkorrosion /11-18/.	Gränsvärde för korrosionshastighet.	
Disko Island, Grönland	Järnkorrosion /11-18/.	Gränsvärde för korrosionshastighet.	
Arkeologiska fynd och meteoriter	Järnkorrosion /11-19/.	Gränsvärde för korrosionshastighet (0,1–10 µm/år).	
Romerska spikar i Inchtutil, Skottland	Järnkorrosion /11-20/.	Gränsvärde för korrosionshastighet (KRISTALLIN I) /11-3/.	

<b>Analogi, land</b>	<b>Processer och scenarier</b>	<b>Data har använts i säkerhetsanalyser</b>	<b>Modeller har använts i säkerhetsanalyser</b>
<b>Lera</b>			
Dunarobba, Italien	Lerans isolerande egenskaper /11-21/.	Lera som barriär för mikrober (SR 97) /11-4/.	
Gotland, Sverige	Bentonitstabilitet /11-22/.	Gräns för illitisering av bentonit /11-2/.	
Sardinien, Italien	Bentonitstabilitet /11-22/.	Gräns för illitisering av bentonit /11-2/.	
Almeria, Spanien	Bentonitstabilitet /11-23/.		
<b>Cement</b>			
Maqarin, Jordanien	Se kapitel 18.	Se kapitel 18.	Se kapitel 18.
Oman	Inverkan av högt pH.	Kolloider och mikrober i vatten med högt pH.	Test av modeller som behövs för att beräkna lösligheter av radionuklider /11-24/.
Gammal betong, Sverige	Se kapitel 18.	Se kapitel 18.	Se kapitel 18.

Av tabellen framgår att analogier ofta använts till att pröva modeller, som i sin tur använts för att beräkna löslighet av radionuklider i grundvattnet. Ofta är studierna genomförda så att flera grupper oberoende av varandra räknat fram vilka halter man borde träffa på av de intressanta elementen, s k Blind Predictive Modelling (BPM). Detta har i flera fall lett fram till förbättringar av databaser och en bättre insikt i hur svårslösliga ämnen uppträder i grundvattnet. Sådana övningar kan också vara av stort pedagogiskt värde.

Materialanalogierna är framträdande. Förekomster av koppar och järn i naturen undersöks som analogier till kapslar; leror undersöks som analogier till buffert och återfyllning. Både koppar och bentonit finns i ren form i naturen, vilket är en stor fördel.

Kolloider har undersökts ingående i flera studier. Analogierna visar att kolloider förekommer och dessutom finns observationer som tyder på att svårslösliga ämnen kan transporteras långt med hjälp av kolloider /11-25, 11-26/. Minst lika viktiga är alla de mätningar som visar att halten kolloider i djupa grundvatten alltid är låg – för låg för att kolloider skulle vara ett allvarligt problem för berget som barriär /11-27/.

Analogiernas kanske största brist är de otydliga fysikaliska och kemiska gränsvärdena. För att komma tillrätta med detta har man på senare tid försökt integrera analogiundersökningarna med experiment både i laboratorium och in situ. Laboratorieexperimenten använder prover från analogin och fältförsöken görs i eller i omedelbar anslutning till analogin /11-28/.

Undersökningarna av analogierna har också gett tillfälle att pröva och utveckla metoder som bör vara användbara även för platsundersökningarna. Provtagning av kolloider är ett exempel på detta, liksom modeller som kan urskilja effekten av blandning respektive reaktion i grundvattnets kemiska sammansättning. Utrustningar för vattenprovtagning, borrhålsteve, radar och flödesloggning har också testats på naturliga analogier, t ex i Palmottu /11-29/.

### **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I granskningen av FUD-program 98 betonades vikten av att studera naturliga analogier och att SKB borde vara beredda på att även i fortsättningen ägna sig åt sådana studier.

### **Nyväunnen kunskap sedan FUD 98 och SR 97**

TVå internationella EU-projekt om naturliga analogier (Okloprojektet /11-30/ och Palmottuprojektet /11-29/), har nyligen avslutats. SKB medverkade i båda. Det enda större analogiprojekt som alltjämt pågår är en undersökning av cementanalogin i Jordanien. Resultaten från fas III av Projekt Maqarin i Jordanien har rapporterats och finns sammanfattade i kapitel 18. Fas IV pågår alltjämt. Studier av materialanalogier till kopparkapseln och bentonitbufferten pågår och beredskap finns för nya insatser om intressanta projekt presenteras.

### **Forskningsprogram**

Under perioden ska fas IV av Jordanienprojektet avslutas. Resultaten från Jordanienprojektet och andra analogiprojekt bearbetas. Undersökningar av materialanalogier fortsätter, främst koppar (se avsnitt 5.2.12) och bentonit (se avsnitt 6.2.17) men även betong (se avsnitt 18.4.2).





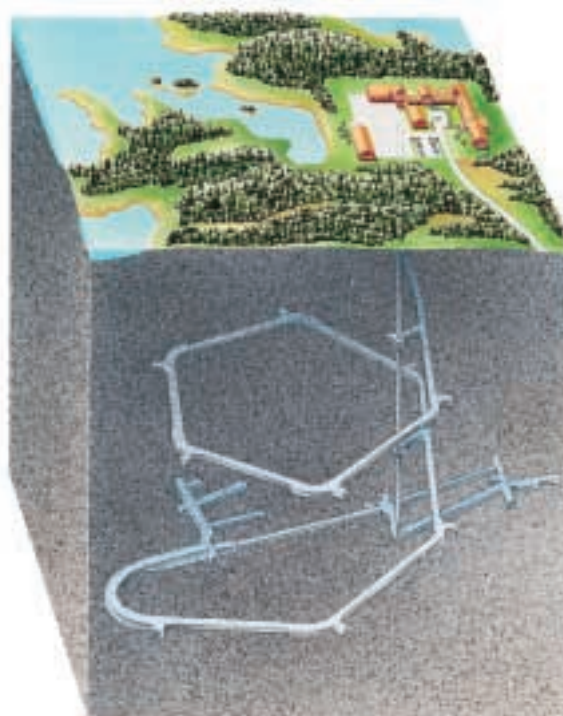
## 12 Äspölaboratoriet

### 12.1 Syfte med Äspölaboratoriet

Ett av de grundläggande motiven bakom SKB:s beslut att anlägga Äspölaboratoriet var att skapa möjlighet till forskning, utveckling och demonstration i en realistisk och ostörd bergmiljö ned till förvarsdjup, se figur 12-1. Vid Äspölaboratoriet pågår en generalrepetition inför driftsättandet av djupförvaret.

Viktiga uppgifter för Äspölaboratoriet är att:

- Utveckla, prova, utvärdera och demonstrera metoder för platskaraktärisering, detaljundersökningar, förvarsdesign, byggande och deponering av använt kärnbränsle och annat långlivat avfall.
- Utveckla och testa alternativ teknik med potential att minska kostnader och förenkla djupförvarskonceptet med bibehållen hög kvalitet och säkerhet.
- Öka den vetenskapliga förståelsen av djupförvarets säkerhetsmarginaler och ge dataunderlag till säkerhetsanalyser av förvarets långsiktiga säkerhet.
- Ge erfarenheter och utbilda personal inför genomförandet av olika moment i djupförvaret.
- Informera utomstående om teknik och metoder som utvecklas för djupförvaret.



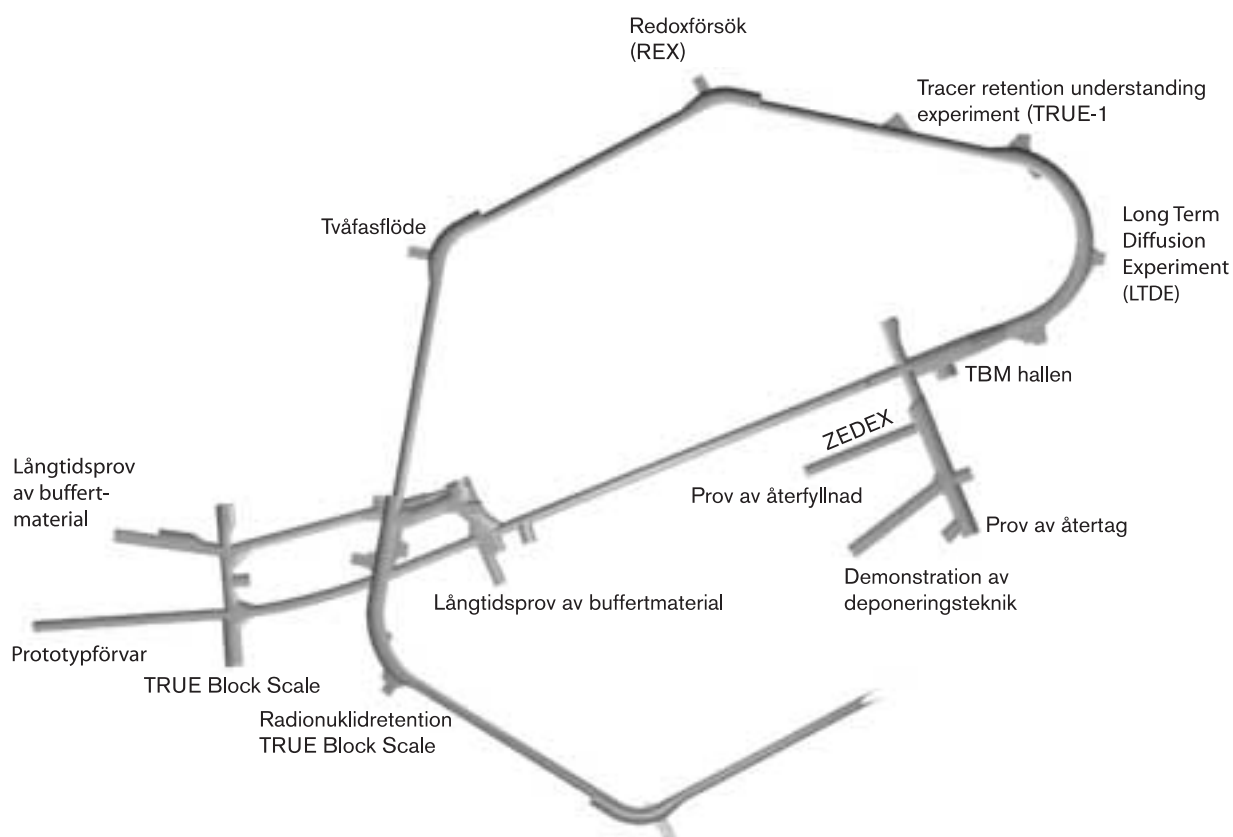
*Figur 12-1. Äspölaboratoriets underjordsdel når ett djup på 460 meter. Tunnelns totala längd är 3 600 meter. Underjord är förbunden med ovanjordsdelarna med hiss- och ventilationsschakt.*

Allt eftersom forsknings- och demonstrationsprojekt har tillkommit har nya experimentområden etablerats. Äspölaboratoriet är nu fullt utnyttjat och nya utrymmen behövs om ytterligare större experiment ska kunna påbörjas. SKB har inga planer på att bygga ut underjordsdelen under den närmaste sexårsperioden. Nya förutsättningar eller behov kan dock komma att förändra detta.

I och med att platsundersökningarna i Forsmark, Tierp och Oskarshamn inleds kommer aktiviteterna i Äspölaboratoriet att minska något. Detta gäller framför allt undersökningar som genomförs i syfte att utveckla metoder och utbilda personer för kommande uppgifter i platsundersökningarna.

Verksamheten vid Äspölaboratoriet kommer enligt planerna att för närvarande pågå tills dess den inledande driftstappen av djupförvaret slutförts. En integrerad utvärdering av erfarenheterna från den inledande driften och resultaten från Äspölaboratoriet kommer således att ligga till grund för ansökan om reguljär drift av djupförvaret. En viktig roll för Äspölaboratoriet i detta perspektiv är att genomföra långtidsexperiment där olika aspekter av betydelse för djupförvarets funktion provats under lång tid, i vissa fall upp mot 15–20 år.

Detta kapitel beskriver de experiment som genomförs för att öka kunskapen om de naturliga barriärerna, se avsnitt 12.2 samt de experiment som berör förvarsteknik, se avsnitt 12.3. Placeringen av de olika experimenten framgår av figur 12-2. Basverksamheten vid Äspölaboratoriet beskrivs i avsnitt 12.4. En redogörelse för hanteringen av undersökningsdata och utvecklingen av platsbeskrivande modeller finns i avsnitt 12.5. Kapitlet avslutas med en genomgång av den internationella verksamheten, se avsnitt 12.6.



**Figur 12-2.** Tunnelsystemet mellan nivåerna –300 till –450 meter och placeringen av de olika experimenten.

Flera av de processer som studeras i experiment vid Äspölaboratoriet har redovisats i föregående kapitel (kapitel 4, 5, 6, 7 och 8). En del moment i den tekniska utvecklingen finns behandlade i kapitel 14. Men eftersom Äspölaboratoriet är en såpass viktig anläggning för att kunna göra experiment i full skala och utveckla teknik för djupförvaring har vi valt att ge en översiktlig redovisning av hela verksamheten i det här kapitlet.

## 12.2 Naturliga barriärer

KBS-3 bygger på ett system av naturliga och tekniska barriärer. För att öka förståelsen för barriärernas långsiktiga funktion kan man i Äspölaboratoriet genomföra experiment under förhållanden som liknar dem som kommer att råda i djupförvaret, dvs på cirka 500 meters djup.

Berggrunden, dess egenskaper och däri pågående fysikaliska och kemiska processer utgör de naturliga barriärerna. De experiment och utredningar som har genomförts eller pågår syftar till att testa modeller som beskriver funktionen hos de naturliga barriärerna. Funktionen kan delas upp på isolering, fördröjning och utspädning. Experiment och projekt med naturliga barriärer omfattar isolering och fördröjning. Utspädning används tills vidare endast i biosfärmodelleringen vid analys av förvarets långsiktiga säkerhet.

I de experiment som genomförts och avslutats har följande studerats:

- Bergets spricksystems uppbyggnad och hydrauliska egenskaper (FCC /12-1, 12-2/ och HPF /12-3/).
- Bergets förmåga att kvarhålla radionuklider i flödesvägarna (TRUE-1 /12-4/, TRUE-Block Scale).
- Skador förorsakade av sprängning och borrning av tunnlar (ZEDEX /12-5/).
- Inflöde av syresatt ytvatten (REDOX /12-6/) och in-situ-förbrukning av syre (REX /12-7/).
- Avgasning av grundvatten samt undersökning av matrisvattenkemin (DEGASSING /12-8/).

Därtill har Äspödata använts för modellering i flera internationella projekt. Bland de internationella projekten kan nämnas Äspö Task Force samt EU-projektet EQUIP (Evidences from Quarternary Infillings for Palaeohydrology) /12-9/.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

En sammanställning av experimentverksamheten under perioden 1995–2000 /12-10/ ger en överblick av syfte, väsentliga resultat och eventuella kvarstående frågor i de projekt som genomförts.

## **Forskningsprogram**

Det övergripande syftet för att testa modeller för bergets barriärfunktion är att:

- Öka den vetenskapliga förståelsen för djupförvarets säkerhetsmarginaler och ge dataunderlag till säkerhetsanalyser av förvarets långsiktiga säkerhet.
- Ta fram de särskilda underlag som behövs för att komplettera data från platsundersökningarna inför ansökan om lokalisering av djupförvaret.
- Tydligt presentera geosfärens roll för de olika barriärfunktionerna isolering, fördröjning och utspädning.

De överordnade målen mot vilka insatserna styrs är:

- Underlag för kommande säkerhetsanalys av kandidatplatser.
- Underlag för utarbetning av program för detaljundersökning.

De experiment som pågår eller planeras är:

- Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE).
- Long Term Diffusion Experiment (LTDE).
- Radionuklidretention experiment (CHEMLAB).
- Mikrobiella experiment (MICROBE).
- Experiment med kolloider (COLLOID).
- Matrisvattenkemi (MATRIX).

Resultat och vunna kunskaper från experimenten, så långt de hunnit eller är planerade, beskrivs kort i kapitlen 4, 6 och 8 i anslutning till respektive process, se tabell 12-1. Där beskrivs också kort den forskning och utveckling som planeras under nästa sexårsperiod. I avsnitt 12.2.1–12.2.6 ges dessutom en översiktlig beskrivning av de experiment som pågår eller planeras.

**Tabell 12-1. Hänvisningar till avsnitt i denna rapport där experimenten beskrivs.**

<b>Experiment</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Process</b>
MATRIX	8.2.13	Reaktioner grundvatten/bergmatris
MICROBE	8.2.15	Mikrobiella processer
COLLOID	8.2.17	Kolloidomsättning
	6.2.19	Kolloid – frigörelse/erosion
TRUE	8.2.28	Integrerad modellering: radionuklidtransport
	8.2.23	Radionuklidtransport: molekylär diffusion samt matrisdiffusion
CHEMLAB	4.2.12	Bränsleupplösning
	4.2.14	Speciering, kolloidbildning
	6.2.25	Radionuklidtransport: diffusion
	6.2.26	Radionuklidtransport: sorption
	8.2.24	Radionuklidtransport: sorption
	8.2.28	Integrerad modellering: radionuklidtransport

### 12.2.1 TRUE

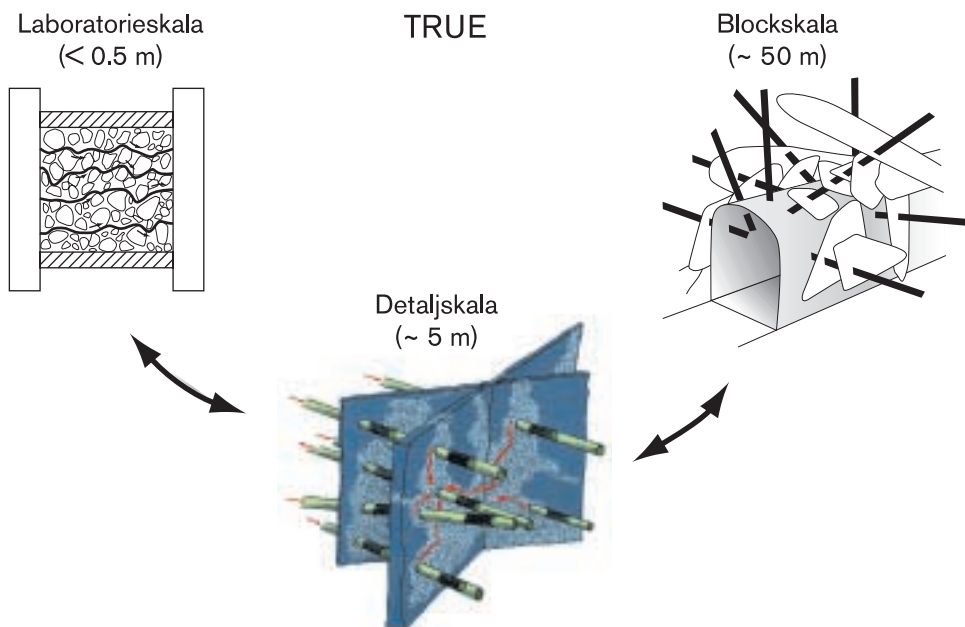
Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE) genomförs för att öka förståelsen av transport och fördröjning av radionuklider i sprickigt berg. Speciellt viktiga är spår försök som genomförs i olika skalor, se figur 12-3. TRUE-programmet initierades år 1994 och beräknas fortsätta till år 2005.

Ett fältexperiment (TRUE-1) i en enskild spricka har genomförts i detaljskala (< 10 meter) /12-4/. Ytterligare ett experiment, TRUE Block Scale, har genomförts i ett nätverk av strukturer i blockskala (10–100 meter) och utvärdering och rapportering pågår för närvarande. Inom den internationella grupp som deltagit i TRUE Block Scale finns planer på ytterligare spårämnesförsök.

### 12.2.2 Long Term Diffusion Experiment

Ett nytt experiment har initierats (Long Term Diffusion Experiment, LTDE). Experimentet syftar till att beskriva diffusion och sorption i bergmassan i anslutning till ett naturligt vattenförande sprickplan under in situ-förhållanden. I ett borrhål med en stor diameter kvarlämnas en ”kärnstubbe” som avskärmas från omgivningen. Med hjälp av ett regelsystem cirkuleras ett spårämne på ett sådant sätt att endast diffusion och sorption kan ske i kärnstubben och den bakomliggande bergvolymen.

Experimentet förväntas pågå i mellan tre och fyra år. Under denna tidsperiod förväntas en indiffusion av svagt sorberande ämnen över en sträcka av några decimeter. Därefter överborras kärnstubben och den bakomliggande bergvolymen samt analyseras med avseende på koncentration av de aktuella spårämnena och radionukliderna.



*Figur 12-3. Schematisk beskrivning av transportskalorna i TRUE-projektet.*

### 12.2.3 CHEMLAB

CHEMLAB-sonden /12-11/ är ett kemiskt laboratorium som byggts in i en borrhåls sond. Experiment kan där genomföras under naturliga grundvattenförhållanden (temperatur, tryck och sammansättning). Sonden används för att studera radionuklidretention. Experiment kan genomföras med radioaktiva ämnen utan risk för kontamination av omgivande berg och grundvatten. De planerade experimenten beräknas pågå i mer än fem år och omfattar:

- Radiolysexperiment med teknetium.
- Transporten av strontium, cesium och jod från bentonitbarriären ut till en vattenförande spricka.
- Ytterligare demonstrationsexperiment för att visa vad redoxprocesser betyder för sorption.
- Transport av aktinider och redoxkänsliga nuklider i en spricka.
- Bränsleupplösning vid förvarsförhållanden.

### 12.2.4 MICROBE

I projektet MICROBE /12-12/ ska mikrobernas inverkan på bergets redoxstabilitet studeras. Experimentområdet för MICROBE ska också tjäna som ett mycket väl karakteriserat område för experiment där förvarsliga förhållanden krävs t ex för att studera mikrobernas inverkan på radionuklidtransport. Ett viktigt forskningsområde är migration, överlevnad och aktivitet av sulfidbildande bakterier (sulfatreducerande bakterier) i buffertmaterial.

Fältexperimenten bedrivs i ett specialinrett utrymme på 450-metersnivån i Äspölaboratoriet. Tre horisontella borrhål har borrats i solfjäderform. Varje borrhål har träffat minst en grundvattenförande spricka. Dessa sprickor har försetts med metallfria avpackningssystem. Grundvatten skall kunna tappas av till olika experiment, eller cirkuleras tillbaka till borrhålssektionen.

Mikrobundersökningarna kommer att vara kopplade till andra pågående experiment med bentonit och koppar. Projektet planeras pågå under hela perioden 2002–2007.

### 12.2.5 COLLOID

Projektet COLLOID /12-13/ syftar till att studera bentonitens roll som källa för kolloidformation, verifiera tidigare uppmätta kolloidkoncentrationer i Äspö samt att undersöka potentialen för kolloidtransport i naturliga flödesvägar i berggrunden.

I laboratorieförsök undersöks bentonitlerans roll som kolloidkälla vid varierande grundvattenshalter. Kolloidhalten i olika sprickzoner längs Äspötunneln kommer att mätas med en laserutrustning som har högre upplösning än tidigare använda utrustningar. För de transportrelaterade mätningarna kommer två närbelägna borrhål som penetrerar samma sprickzon att användas.

SKB initierade projektet år 2000 och projektet planeras pågå till och med år 2003.

## 12.2.6 MATRIX

Normalt provtas vattnet i bergets sprickor. Den sammansättning som detta vatten har är inte nödvändigtvis representativt för matrisvattnet, det vill säga det vatten som finns i bergets porer och mikrosprickor. Projektet MATRIX /12-14/ syftar till att genomföra fältstudier av den kemiska sammansättningen hos matrisvattnet.

Experimentets mål är att:

- Bestämma matrisvattnens ursprung och ålder.
- Fastställa huruvida pågående eller tidigare diffusionsprocesser påverkat matrisvattnens sammansättning antingen genom utspädning eller ökad koncentration.
- Erhålla ett urval av grundvattensammansättningar som lämpliga indata till närområdesmodellberäkningar.
- Fastställa tunna sprickors och mikrosprickors inverkan på matrisvattnens kemi i berggrunden.

Experimentet har utformats för att provta matrisvattnet från förutbestämda isolerade borrhålssektioner. Borrhålens placering valdes med utgångspunkt från bland annat bergart, mineral och geokemisk homogenitet, djup samt förekomst och frånvaro av sprickor. För att provta matrisvattnet har en specialutrustning konstruerats.

Från september 1999 tills idag har ett omfattande undersökningsprogram pågått och projektet kommer att avslutas under år 2002.

## 12.3 Förvarsteknik

Äspölaboratoriet ger värdefulla erfarenheter när det gäller att vidareutveckla och prova teknik för att bygga ett förvar och för att undersöka berget i samband med byggandet. Ett underlag för val av brytningsmetodik i djupförvaret har erhållits genom att tunneldrivning utförts både med konventionell sprängning och borrhning och med en tunnelborrningsmaskin (TBM).

Äspölaboratoriet används för att i full skala och under realistiska förhållanden pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter i djupförvarssystemet. Det är också viktigt att visa att hög kvalitet kan nås i utformning, byggande och drift av ett djupförvar. En fullskaleprototyp av djupförvaret håller på att byggas för att simulera förvarets funktion och samverkan mellan dess delar under det inledande skedet efter förslutning. Utveckling av kvalitetssystem ingår i arbetet.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

Vid Äspölaboratoriet har tekniken för att hantera och deponera kapslar, återfylla deponeringstunnlar liksom förberedelser för att återta deponerade kapslar utvecklats och demonstrerats i stort sett enligt den plan som beskrevs i FUD-program 98 /12-15/.

## Utvecklingsprogram

De övergripande syftena med experimenten är att:

- Utveckla teknik och demonstrera hela hanteringskedjan inför den inledande driften av djupförvaret.
- Demonstrera återtag av en deponerad kapsel.
- Undersöka funktionen hos buffert och återfyllning under såväl återmättnadsförloppet som i vattenmättat tillstånd i förvarsmiljö.

De experiment som pågår eller planeras är:

- Demonstration av deponeringsteknik.
- Prototypförvaret.
- Backfill and Plug Test.
- Återtag.
- Långtidsprov av buffertmaterialets funktion.

Resultat och vunna kunskaper från experimenten, så långt de hunnit eller är planerade, beskrivs kort i kapitlen 6, 7 och 14, se tabell 12-2. Där beskrivs också kort den forskning och utveckling som planeras under nästa sexårsperiod. I avsnitt 12.3.1–12.3.5 ges dessutom en översiktlig beskrivning av de experiment som pågår eller planeras.

Därtill pågår ett antal projekt med internationellt deltagande. Dessa omfattar bland annat modellering av ingenjörskarriärerna inom Task Force samt ett EU-projekt i anslutning till Prototypförvaret, se avsnitt 12.6.2.

**Tabell 12-2. Hänvisningar till avsnitt i denna rapport där experimenten beskrivs.**

Experiment	Avsnitt	
Demonstration av deponeringsteknik	14.5.3	Inplacering av bentonit och deponering av kapslar
Prototypförvaret	14.5.3	Inplacering av bentonit och deponering av kapslar
Backfill and Plug Test	14.5.4	Återfyllning
	7.2.2	Integrerade studier: återfyllningens sammansättning och funktion
Återtag	14.5.3	Inplacering av bentonit och deponering av kapslar
	14.5.6	Återtag
Långtidsprov av buffertmaterialets funktion (LOT)	6.2.17	Montmorillonitombildning
	6.2.18	Lösning/fällning föroreningar
	6.2.23	Integrerade studier: buffertens utveckling vid mättade förhållanden
	6.2.24	Radionuklidtransport: advektion
	6.2.25	Radionuklidtransport: diffusion



### 12.3.1 Demonstration av deponeringsteknik

Projektet "Demonstration av deponeringsteknik" har som mål att:

- Utveckla och prova metodik och utrustning för deponering av använt kärnbränsle.
- På ett åskådligt sätt demonstrera de olika stegen vid deponering och återtag av kapslar för specialister och allmänhet.
- Utveckla och prova ändamålsenliga kriterier och kvalitetssystem för deponeringsprocessen.

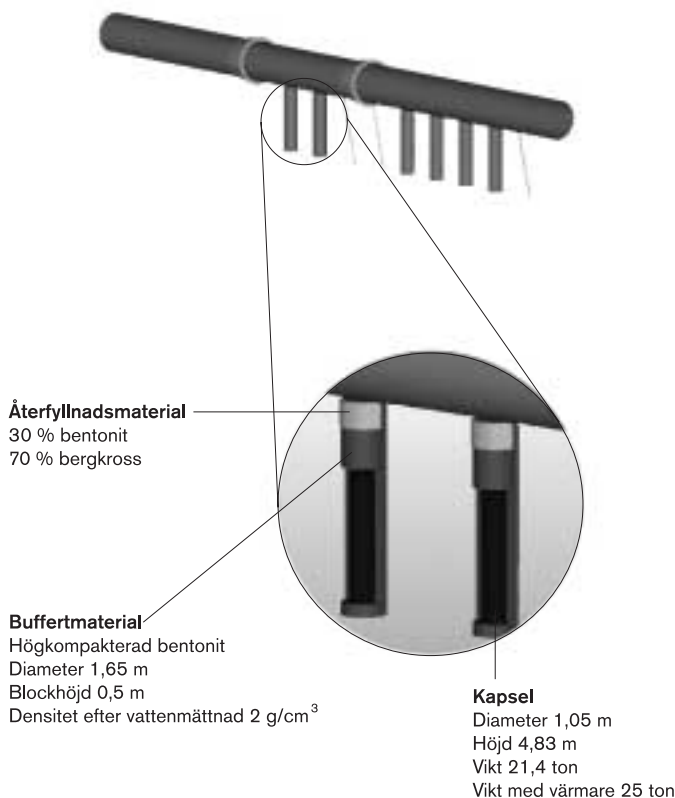
För att kunna genomföra projektet har SKB utvecklat en prototyp av en deponeringsmaskin i full skala.

Demonstration av deponeringsteknik har genomförts i experimentet Återtag, där bentonit och en kapsel i naturlig storlek med värmare har deponerats. I experimentet Prototypförvar kommer deponering att ske av ytterligare sex kapslar. Dessa experiment beskrivs nedan.

### 12.3.2 Prototypförvaret

Experimenten i Prototypförvaret fokuserar på övervakning av förvarssystemets funktion och samverkan hos djupförvarets delar. Vissa aktiviteter som syftar till utveckling och prov av praktiska lösningar för att genomföra deponering har också inkluderats.

Totalt kommer sex deponeringshål att borrar i en TBM-borrade tunnel, två i en inre sektion och fyra i en yttre, se figur 12-4. Tunnlarna återfylls med en blandning av



*Figur 12-4. Utformning av Prototypförvaret.*

bentonit och krossat berg och de två sektionerna separeras med en plugg. Prototypförvaret skiljer sig från ett verkligt förvar i det att värmeeffekten genereras av elektriska värmare istället för använt kärnbränsle.

Experimenten i Prototypförvaret kommer att starta under 2001 och 2002 för att därefter pågå i upp till cirka 20 år.

### 12.3.3 Backfill and Plug Test

Forskningen om återfyllning med blandningar av bentonit och krossat berg görs för närvarande till stor del vid Äspölaboratoriet inom ramen för experimentet Backfill and Plug Test i Äspölaboratoriet. Syftet med experimentet är att:

- Ta fram och testa olika material och packningstekniker för att återfylla utsprängda tunnlar.
- Testa återfyllningens funktion och samverkan med omgivande berg i full skala i utsprängda tunnlar.
- Utveckla teknik för att bygga pluggar och testa funktionen.

I experimentet har en tunnel återfyllts dels med bergkross och dels med en blandning av 70 procent bentonit och 30 procent krossat berg. Tunneln har förslutits med en plugg som utformats för att motstå fullt vattentryck och bentonitens svälltryck. Dräneringsmattor används för att påskynda bevätningen av återfyllningen. Under experimentet mäts vattenflödet i återfyllningen. Detta sker både i omättat tillstånd (under vattenmättnadsprocessen) och i vattenmättat tillstånd.

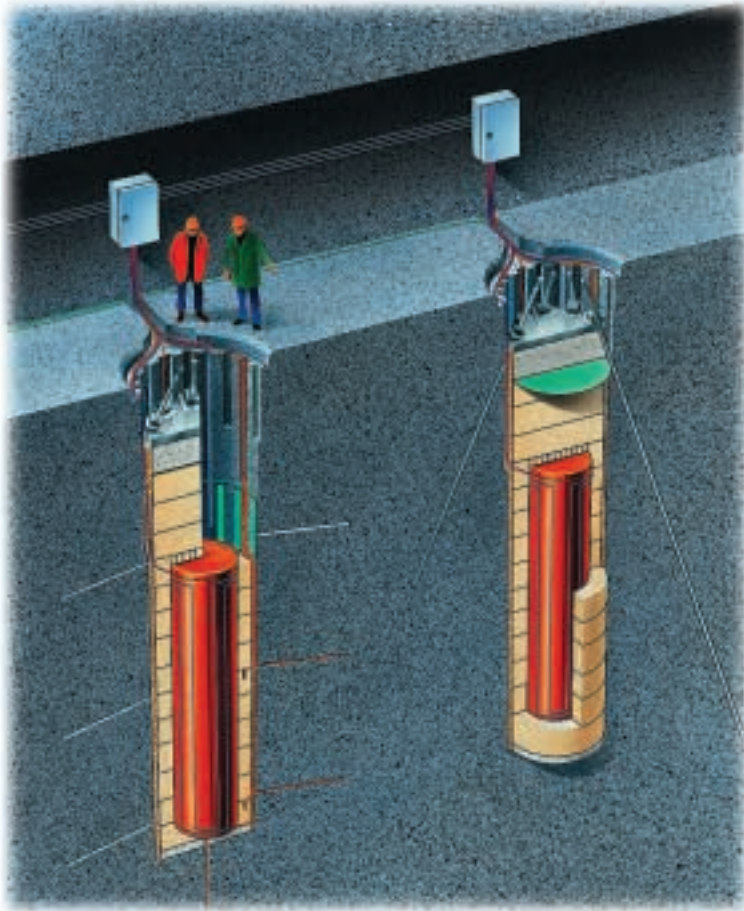
Experiment startades under 1999. Till att börja med ska återfyllningen vattenmättas, vilket beräknas ta några år. Därefter genomförs flödestester under omkring ett år. Experimentet avslutas med att återfyllnadsmaterialet grävs ut och analyseras.

### 12.3.4 Återtag

I projektet "Återtag" utvecklas och provas metodik och utrustning för att återta kapseln från en vattenmättad och uppsvälld bentonitbuffert samt visa hur en frilagd kapsel kan återtas under realistiska förhållanden. Projektet startades under år 2000 då bentonit och en kapsel i naturlig storlek med värmare deponerades i ett fullstort deponeringshål, se figur 12-5.

Under vattenmättnadsperioden samlas data in om vattenmättnad, temperatur, svälltryck och rörelser i bufferten. Berget instrumenteras för övervakning av temperatur, bergspänningar och bergrörelser. Dessutom mäts kopparhöljets deformation och temperaturen på kapseln.

Efter det att bentoniten vattenmättats, vilket förväntas ta mellan tre och fem år, kommer SKB att demonstrera hur en kapsel kan frigöras och återtas. Bentoniten kommer att avlägsnas genom spolning med saltvatten. När kapseln lösgjorts från bentoniten lyfts den i locket och förs in i ett strålskydd.



*Figur 12-5. Skiss av experimentuppställningen i prov av återtag. De två bilderna visar olika delar av utformning och installation i samma hål.*

### 12.3.5 Långtidsprov av buffertmaterialets funktion

Långtidsprov av buffertmaterialets funktion genomförs i experimentet Long Term Test of Buffer Material (LOT) på 450-metersnivån i Äspö. Testserien omfattar totalt sju försökspaket med försökstider på ett, fem eller 20 år. I varje försök placeras ett paket som innehåller värmare, kopparrör, förkompakterade bentonitblock och instrument. Värmarna används för att simulera resteffekten från använt kärnbränsle och styrs till att ge KBS-3-förhållanden (maximalt 90 °C) samt för att ge mer aggressiva förhållanden (cirka 130 °C).

Under försöken registreras effekt, temperatur, tryck och fukttinhåll i bentoniten. Referens och exponerat bentonitmaterial analyseras med avseende på fysikaliska egenskaper (svälltryck, hydraulisk konduktivitet, reologi etc) och mineralogiska egenskaper (katjonbyteskapacitet, joninnehåll, mineralfördelning etc).

Bentonit dopad med radioaktiva spårämnen har placerats i bentoniten för att studera diffusion. Ett stort antal mikroorganismer har introducerats i utvalda bentonitblock. Dessutom har små välkaraktäriserade kopparkuponger placerats i bentoniten på utvalda platser.

Två pilotförsök (ettårsförsök) har avslutats och rapporterats med avseende på konstruktion, fältdata och laboratorieresultat /12-16/. Pågående ettårsförsök med förhöjd temperatur kommer att avslutas och analyseras under 2001 i enlighet med provningsprogrammet. De tre pågående femårsförsöken kommer att avslutas och analyseras under 2004 /12-16/.

## **12.4 Basverksamhet vid Äspölaboratoriet**

Vid Äspölaboratoriet bedrivs en basverksamhet för att stödja forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprojekten. Verksamheten driver och genomför mätningar av gemensamt intresse för samtliga projekt, tillhandahåller resultat och sammanställer modeller från olika vetenskapsområden samt utvecklar och förvaltar SKB:s geodatabas.

### **12.4.1 Övervakning av grundvattentryck**

Redan under förundersökningsskedet inleddes arbetet med att bygga ut ett system för övervakning av grundvattentrycken i borrhål på Äspö och närliggande områden, det så kallade Hydro Monitoring System (HMS). Systemet har successivt byggts ut och omfattar nu även ett större antal borrhål under jord. Grundvattentrycket mäts normalt varannan timme och mätvärdena lagras i en databas. Systemet ger möjlighet att mäta störningar av grundvattennivåerna orsakade av olika händelser i laboratoriet och annorstädes. Dessa mätvärden kan sedan användas för att vidareutveckla och utvärdera olika hydrauliska modeller över Äspö samt att kontrollera randvillkoren för olika experiment som genomförs vid laboratoriet. HMS kommer att byggas ut i takt med de behov som definieras av de olika projekten.

Under den förutvarande perioden utökades både antalet borrhål och borrhålssektioner främst på grund av det behov som projekten TRUE Block Scale och Prototypförvar hade.

Övervakning av grundvattentrycken på Äspö är också ett krav enligt vattendomen.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

En övergripande utvärdering av övervakningssystemet genomfördes med syfte att föreslå förbättringar samt att utgöra underlag till utformning av ett grundvattenövervakningssystem för platsundersökningarna.

Övervakningssystemet har utnyttjats för att i ett pilotprojekt kunna beräkna sprickzoners strykning och stupning från tryckvariationer orsakade av tidvatteneffekter. Härvid används förutom grundvattentrycken även vattennivån i Östersjön och lufttrycksdata. Metodens tillförlitlighet är ännu ej fastställd.

### ***Utvecklingsprogram***

För den kommande perioden ämnar SKB underhålla driften av systemet och stödja pågående och tillkommande experiment allt efter behov.

## 12.4.2 Monitering av grundvattnets kemiska sammansättning

Ett omfattande program för grundvattenkemisk karakterisering genomfördes redan under förundersökningsfasen inför byggandet av Äspölaboratoriet /12-17/. Under konstruktionsfasen fortsatte provtagningarna i observationsborrhål borrade från markytan på Äspö och från sonderingshål i tunneln. Många av dessa hål ingick i ett övervakningsprogram och provtogs flera gånger /12-18/. Resultaten användes för att stämma av och vidareutveckla de hydrokemiska modeller som upprättats på basis av förundersökningarna /12-19/.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

Provtagningarna har fortsatt som planerat under driftskedet för att följa de förändringar som anläggningen ger upphov till. Prover tas nu regelbundet en gång per år från utvalda borrhål ovan och under jord.

Analysdata har visat att den kemiska sammansättningen i hela Äspölaboratoriet är mycket stabil och att en provtagningsfrekvens om en gång per år är tillräcklig.

Erhållna data används i modeller för grundvattenflöde och grundvattenkemi för att tolka anläggningens långsiktiga inverkan på grundvattenomsättning i området och på geokemiska förhållanden. Inom Äspö:s internationella arbetsgrupp (Task Force) för modellering av grundvattenflöde och transport har dessa data använts för en modelleringsövning, Task 5, som syftar till att integrera hydrauliska och kemiska data, se avsnitten 8.2.3, 8.2.21 och 12.6.1.

### ***Utvecklingsprogram***

Nuvarande omfattning och frekvens av provtagningarna planeras fortsätta tills vidare.

## 12.5 Undersökningsdata och platsbeskrivande modeller

SKB har under lång tid utvecklat metoder för att administrera och arkivera undersökningsdata. Undersökningsdata som insamlats på senare tid hanteras centralt i en databas som kallas SICADA, vilken beskrivs i avsnitt 12.5.1.

Under förstudierna har ett geografiskt informationssystem, GIS, nyttjats för att sammanställa och redovisa insamlad information.

SKB använder CAD-metoder för att upprätta en tredimensionell platsbeskrivande modell. Modellen skapas i ett format som är direkt användbart för utformningen och dokumentationen av djupförvaret. Flera system för simulering av processerna (processmodellerna) är också integrerade med olika typer av CAD-system. Att överföra information om den platsbeskrivande modellen till processmodellerna är på så sätt direkt genomförbart, men i flera fall kommer det att krävas särskilda gränssnitt. SKB planerar att använda ett egenutvecklat system för att upprätta de platsbeskrivande modellerna. Systemet kallas Rock Visualisation System (RVS) och beskrivs i avsnitt 12.5.3.

Det fortsatta arbetet under den kommande treårsperioden är först och främst inriktat på att ytterligare effektivisera och bredda dataflödet mellan de olika delsystemen. Den viktigaste milstolpen är att färdigställa metodiken i sådan omfattning att platsundersökningsskedet kan inledas med verktyg som gör att kvalitetssäkrade data kan administreras på ett effektivt och spårbart sätt.

### **12.5.1 Geovetenskaplig databas - SICADA**

Data från SKB:s undersökningar, inklusive de mätningar som utförs vid experiment vid Äspölaboratoriet, finns lagrade i SKB:s geovetenskapliga databas SICADA. Databasen utgör ett verktyg för att långsiktigt bevara data på ett säkert och spårbart sätt samt utgör en entydig källa av indata för fältarbeten, tolkningar, utvärderingar och modeller. I slutändan medför detta att säkerhetsanalyser baseras på korrekta data.

#### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

Arbetet har planenligt fortsatt mot målet att hålla SICADA modernt och få den att vara ett effektivt verktyg vid pågående experiment vid Äspölaboratoriet och vid kommande platsundersökningar.

Utvecklingen av databasen har under den senaste perioden lett fram till ett för verksamheten anpassat och stabilt system. Ett antal anpassningar har utförts för att förbättra användarvänligheten samt att koppla samman databasen med omkringliggande system för för- eller efterbehandling av data. Ett sådant exempel på system är det modelleringsverktyg RVS som SKB utvecklat.

#### ***Utvecklingsprogram***

Den fortlöpande utvecklingen intensifieras så att alla större utvecklingsinsatser kan vara avklarade innan platsundersökningarna inleds. Därefter sker fortlöpande underhåll och utveckling för att tillgodose de krav på systemet som uppstår under tiden för undersökningarna.

Organisationen för informationsförvaltningen kommer att förstärkas och rutinerna för hanteringen av data att förfinas för att på ett snabbt och effektivt sätt kunna ta hand om och säkra de datamängder som kommer att samlas in samt vidarebefordra dessa till avnämarna, se även avsnitt 13.3.

För Äspölaboratoriets räkning kommer systemet under samma period att anpassas så att det kan hantera aktiviteter och information från deponering av buffert och kapslar, återfyllnad av tunnlar samt pluggning av tunnlar och borrhål.

### **12.5.2 Geografiskt informationssystem - GIS**

Under de genomförda förstudierna har GIS använts som ett kraftfullt verktyg för att sammanställa och presentera information. Under platsundersökningarna kommer GIS att ingå som ett av SKB:s verktyg för informationsbehandling. Dess roll kommer att utökas så att den utöver sammanställningar och presentationer även kommer att användas för mer omfattande analyser av data samt som ett verktyg för att informera allmänheten.

### ***Nyvunnen kunskap sedan FUD 98***

Roller och ansvar har definierats och processer för drift, utveckling och informationsförvaltning har införts.

#### ***Utvecklingsprogram***

Driften av systemet kommer att organiseras och drifrutiner upprättas för att säkerställa en hög tillgänglighet och säker hantering av informationen i systemet. Komponenter kommer att tillföras som medger en strukturerad intern och extern tillgång till data.

GIS-systemet ska, på samma sätt som SICADA, långsiktigt kunna bevara data på ett säkert och spårbart sätt samt att utgöra en entydig källa av data för fältarbeten, tolkningar, utvärderingar och modeller.

Utveckling kommer att ske så att ett strukturerat utbyte av information mellan GIS och SICADA möjliggörs. Dessutom krävs en metodik för överföring av GIS-data till RVS. Applikationer för SKB:s centrala och kritiska analysbehov kommer att upprättas i egen regi när sådana inte finns på marknaden.

### **12.5.3 Visualisering av undersökningsdata – RVS**

SKB utvecklar ett system för tredimensionell visualisering av undersökningsdata och modellering av de gränssytor som beskrivits i inledningen till detta avsnitt. Systemet kallas Rock Visualisation System (RVS) och bygger på den kommersiella CAD-programvaran MicroStation/J. Det ingår också som ett grundverktyg för projektering av underjordsanläggningar.

### ***Nyvunnen kunskap sedan FUD 98***

Beslut har fattats att komplettera och modifiera systemet så att det uppfyller de behov som specificerats /12-20/. Detta arbete är mycket konkret inriktat på att förbereda systemet för platsundersökningsskedet. Samtidigt kommer systemet att baseras på den nya versionen av MicroStation som kallas MicroStation V8 vilket förväntas ge betydande fördelar för verksamheten.

#### ***Utvecklingsprogram***

En förvaltningsorganisation för systemet ska bemannas och drift- och övervakningsrutiner tas fram och vara etablerade under inledningsskedet av platsundersökningarna och därefter kompletteras och anpassas efter uppkommande behov.

Ett intensivt utvecklingsarbete planeras för att tillföra systemet egenskaper som stödjer den modelleringsteknik som presenterats /12-20/. I detta arbete ingår också upprättande av en central databas för administration av platsbeskrivande modeller. Dessutom behövs verktyg för att överföra informationen om den platsbeskrivande modellen till processmodellerna. Det kan också bli aktuellt att stödja återföring av resultaten till den platsbeskrivande modellen för att underlätta tolkningen av desamma.

Dessutom behövs planering och genomförande av användarutbildning samt framtagning av rutiner för hur systemet ska användas.

#### **12.5.4 Geovetenskapliga modeller över Äspöområdet**

På Äspö har geovetenskaplig information systematiskt samlats in under förundersöknings-, anläggnings- och driftskedet. Data samlas även fortsättningsvis in från de olika tester och projekt som bedrivs. Den information som inhämtats till och med färdigställande av huvudtunneln ner till 450-metersnivån har använts vid utarbetande av plats-specifika modeller över förhållandena på Äspö. Syftet med framtagandet av dessa modeller har i huvudsak varit att verifiera förmågan att kunna förutsäga en bergmassas egenskaper med utgångspunkt från information från gjorda undersökningar.

Planen 1998 var att uppdatera de geologiska, geohydrologiska och geokemiska modellerna över Äspö genom en detaljering av bergblocket inom spiralrampen med hjälp av de data som tagits fram under drivningen av rampen. Därtill planerades för en framtagning av en bergmekanisk modell respektive värmetransportmodell över samma bergvolym. Inget av detta har kommit till utförande i sin helhet under perioden och uppdateringen av de geologiska-, geohydrologiska- och geokemiska modellerna är bordlagd till förmån för arbetet med att förbereda platsundersökningar. Arbetet med den geomekaniska modellen påbörjades under perioden men hinner förmodligen inte fullföljas helt under år 2001. Värmetransportmodellen har likaså påbörjats men hinner sannolikt ej heller fullföljas helt under 2001.

#### ***Nyvunnen kunskap sedan FUD 98***

Geologi-, geohydrologi- och geokemimodellerna över Äspövolymen beskrivs /12-21/ och har visat sig vara tillräckliga underlag för planering av platsundersökningsverksamheten. Ytterligare detaljeringar har inte heller behövts för de experiment som bedrivs. Lämpliga randvillkor för modelleringsbehoven har kunnat räknas fram med befintlig information.

Bergmekaniska frågor aktualiseras framför allt i Prototypförvaret där uppvärmningen med de simulerade förvarskapslarna kommer att inducera så stora spänningar i berget, att förändringarna kan följas via t ex akustisk emission. Därmed har också matematiska modeller ett intresse, eftersom förutsägelser kan jämföras med verkliga utfall.

Detsamma gäller för värmetransport; dock ska noteras att i de storskaliga experiment som genomförts i granitisk berggrund (BMT i Stripa, FEBEX i Grimsel och Buffer Container Experiment i URL i Pinawa) har matematiska koder för värmetransport visat sig vara pålitliga och noggrannast av alla modellkoder. Detta förutsätts också vara fallet i Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet.

#### ***Utvecklingsprogram***

Framtagandet av en geomekanisk och en värmetransportmodell slutförs. Underlag samlas in för komplettering av den transportmodell för radionuklider som kommit till användning i SKB:s säkerhetsanalyser av ett djupförvar.



## 12.6 Internationellt samarbete

Verksamheten vid Äspölaboratoriet har rönt stort internationellt intresse. Avtal om deltagande finns med: Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Japan; Central Research Institute of Electric Power Industry (Criepi), Japan; Agence National Pour la Gestion des Dechets Radioactifs (Andra), Frankrike; Posiva Oy, Finland; UK Nirex, Storbritannien; Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweiz; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Tyskland; Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), Spanien och United States Department of Energy, Carlsbad Area Office (USDOE/CBFO), USA.

Det internationella samarbetet 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. I TEF deltar, förutom IJC-medlemmarna, tekniska experter från varje organisation som deltar i Äspölaboratoriets verksamhet.

Det praktiska samarbetet sker genom att organisationerna har personal på platsen och deltar i genomförandet av olika experiment. Fler av de deltagande organisationerna har planerat ytterligare undersökningar och experiment som specificerats i de avtal som träffats med respektive organisation. Dessa experiment genomförs utöver det program som här redovisas och ger ett betydande mervärde till SKB:s verksamhet.

Det internationella samarbetet gör det möjligt att samla världens främsta experter inom många olika ämnesområden för utbyte av idéer och erfarenheter om frågor av betydelse för deponering av radioaktivt avfall. Exempel på detta är samarbetet som genomförs i en arbetsgrupp, så kallad Task Force, med medlemmar från de deltagande organisationerna. Sådana arbetsgrupper finns för modellering av grundvattenströmning och transport (se avsnitt 12.6.1) och för modellering av tekniska barriärer (se avsnitt 12.6.2). En viktig del i samarbetet är också den granskning av Äspölaboratoriets planer för utformning av olika experiment samt erhållna resultat, som SKB:s internationella partners och deras experter gör.

Resultaten från det internationella samarbetet redovisas i en separat rapportserie, Äspö International Cooperation Reports.

### 12.6.1 Arbetsgrupp (Task Force) för modellering av hydraulisk transport

Till Äspölaboratoriet har knutits en internationell arbetsgrupp för modellering (Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes). Gruppen initierades av SKB i slutet av 1992 med syfte att utvärdera tillämpligheten av olika modeller.

Arbetsgruppen ska utgöra ett forum för samverkan och diskussion om konceptuell och numerisk modellering av grundvattenflöde och transport av radionuklider för de organisationer som deltar i samarbetet.

Arbetsuppgifterna har hittills omfattat:

- Task 1** Modellering av LPT-2, ett storskaligt långtidspumpstest och därtill hörande spår försök /12-22/.
- Task 2** Designberäkningar för planerade spår försök i detaljskala /12-23 till 12-27/.
- Task 3** Modellering av den hydrauliska påverkan av Äspötunneln /12-28/.
- Task 4** Prediktiv modellering av spår försök med sorberande och icke-sorberande spårämnen genomförda inom TRUE-1 projektet /12-29, 12-30/.
- Task 5** Koppling mellan hydrogeologiska och hydrokemiska modeller /12-31/.
- Task 6** Säkerhetsanalysmodellering baserat på data från platskaraktärisering.

Gruppen arbetar för närvarande med Task 6 som syftar till att öka realismen i de modeller som utnyttjas för säkerhetsanalys, genom att tillvarata resultat och metodik som används för platsundersökningsutvärdering. Detta genomförs genom att tillämpa båda modelleringssätten på samma dataunderlag samt sätta randvillkor som brukar utnyttjas vid säkerhetsanalysmodellering. Förhoppningen är att kunna identifiera konceptualiseringar (i processer och geologier) som är relevanta i det långa tidsperspektivet som säkerhetsanalysen har. Omvänt kan detta ge underlag för vilka data ifrån en platsundersökning som säkerhetsanalysen har behov av. Starten för modelleringen beräknas till 2001 och pågår i tre till fyra år.

Arbetet med Task 4 och 5 har bedrivits i enlighet med planen och båda kommer att avslutas under 2001. En ny uppgift – Task 6 – har definierats och initierats.

### ***Nyvvunnen kunskap sedan FUD 98***

Den modellering som genomfördes inom ramen för Task Force har kunnat relatera den kunskap och de verktyg för modelleringen som SKB använder till internationell standard och praxis.

### ***Utvecklingsprogram***

Målet är att genomföra Task 6. Ytterligare modellövningar kan komma att definieras i samarbete med de utländska organisationer som deltar i arbetsgruppen.

## **12.6.2 Arbetsgrupp för modellering av tekniska barriärer**

### ***Bakgrund***

En arbetsgrupp för modellering av tekniska barriärer (Task Force on Engineered Barrier Systems) har likaså initierats. Den koncentreras under treårsperioden på vattenmättnadsprocess i buffert, återfyllning och berg. Eftersom vattenmättnadsprocessen också är en del av modelleringsarbetet i Prototypförvaret har Task Force-arbetet kopplats ihop med modelleringsarbete inom ett EU-projekt. Skillnaden är att organisationerna GRS (Tyskland) och ANDRA (Frankrike), som står utanför EU-projektet, deltar i modelleringsarbetet inom ramen för Task Force-verksamheten. De får tillgång till samma data som deltagarna i EU-projektet. Den aktuella arbetsuppgiften är:

**Task 1** Termohydro-mekanisk modellering av processer under vattentransport i buffert, återfyllning och närfältberg.

### ***Utvecklingsprogram***

Målet är att genomföra Task 1. Nya arbetsuppgifter kommer successivt att definieras i samarbete med de utländska organisationerna som deltar i Äspösamarbetet.



## 13 Instrument och metoder för platsundersökningar

SKB har idag ett omfattande program för planering och förberedelser inför kommande platsundersökningar. Undersökningsmetoder och mätinstrument utvecklas och testas. I förberedelserna ingår också att upprätta en policy för långtidsobservationer samt att utarbeta preliminära program för dessa. I kompletteringen till FUD-program 98 /13-1/ gavs en samlad redovisning av SKB:s program inför platsundersökningsskedet och ytterligare precisering ges inte här. Platsspecifika program presenteras under hösten 2001.

I stället fokuseras kapitlet på den utveckling av viktiga undersökningsmetoder och mät-system som pågår. Datahantering, byggande av platsbeskrivande modeller och överföring av information mellan undersökningar, projektering och säkerhetsanalys är andra delar som belyses.

### 13.1 Bakgrund

De geovetenskapliga förutsättningarna är grundläggande för att avgöra om en plats är lämplig för ett djupförvar. Utvecklingen av platsundersökningsprogrammet har pågått kontinuerligt under hela 1990-talet. De olika redovisningar, som myndigheterna begärde i samband med granskningen av FUD-programmet 98, har lämnats genom redovisningen i kompletteringen och dess underlagsrapporter /13-1/. Där presenteras ett vetenskapligt program för undersökning och utvärdering av platser /13-2/. Här framgår både vilken typ av information som avses samlas in från en plats och hur den ska användas vid utvärdering av platsens lämplighet för ett djupförvar. Även en fördjupad och mer detaljerad beskrivning av hur undersökningar av platsernas geosfär och biosfär kan genomföras har redovisats /13-3/. Där preciseras vad som ska eller kan mätas, vilka metoder som ska användas och hur platsbeskrivande modeller ska upprättas. Båda rapporterna beskriver generellt hur verksamheten i platsundersökningsskedet kan genomföras, utan direkt anpassning till de platser som ska undersökas. När innehåll och omfattning av de olika etappernas delsteg anpassas till de olika platserna kan det visa sig att vissa undersökningsmoment måste tillföras, medan andra moment är onödiga och därför kan utgå. Ordningföljden mellan de olika undersökningsmomenten kan också behöva modifieras. Det väsentliga är att den platsspecifika informationen inhämtas när den behövs och att den slutligen är tillräcklig för den platsbeskrivande redovisningen och säkerhetsanalysen.

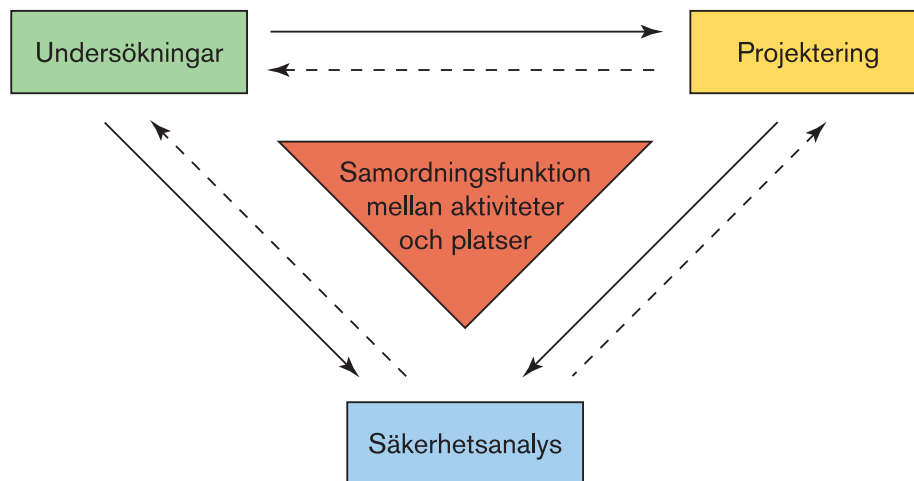
För de valda områdena pågår nu arbetet med att upprätta program för att genomföra platsundersökningarna. Dessa kommer att anpassas till områdenas förhållanden och speciella frågeställningar. De platsspecifika programmen, som huvudsakligen kommer att handla om de inledande undersökningarna, kommer att presenteras under hösten 2001. Inriktningen är att kunna inleda platsundersökningarna i början av 2002. Under arbetet med att utforma de platsspecifika programmen kommer synpunkter att inhämtas från bl a berörda markägare, myndigheter och kommuner. SKB strävar efter att genomföra undersökningarna på ett sådant sätt att intrång och störningar för närboende samt natur- och kulturmiljö begränsas utan menlig påverkan på undersökningsresultatet som helhet. De platsspecifika undersökningsinsatserna kommer inledningsvis att inriktas på att besvara de platsspecifika frågor avseende berggrunden som presenterats i SKB:s samlade redovisningen av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet /13-1/.

SKB utgår i sin planering från att de under hösten 2001 presenterade plats specifika programmen i huvudsak kan genomföras som tänkt. SKB räknar med att i platsundersökningsskedet ha en löpande dialog med SKI och SSI om undersökningarnas genomförande och resultat.

## 13.2 Undersökningar, projektering och säkerhetsanalys

Under platsundersökningsskedet kommer arbetet att kretsa kring tre tekniska huvudaktiviteter: undersökningar, projektering och säkerhetsanalys, se figur 13-1. Undersökningarna ger resultat som måste analyseras och tolkas för att kunna ge en användbar beskrivning av platsen. Projektering behöver den platsbeskrivande modellen för att ta fram en anläggningsbeskrivning med förvarsutformning. Projekteringen ska även bedöma konsekvenserna av anläggningsarbetena. Säkerhetsanalysen utvärderar den långsiktiga säkerheten utifrån den platsbeskrivande modellen och förvarsutformningen. En detaljerad redogörelse återfinns i /13-2/.

Större säkerhetsbedömningar levereras åtminstone vid två tillfällen under platsundersökningsskedet; dels i form av en preliminär säkerhetsbedömning baserad på data från den inledande platsundersökningen, dels som en säkerhetsanalys baserad på data från den kompletta platsundersökningen. Dessutom används de preliminära bedömningar och analyser som görs inom ramen för säkerhetsanalyset vid planeringen av de fortsatta undersökningarna samt den platsbeskrivande modelleringen. Säkerhetsmässiga aspekter på layoutförslag eller mer detaljerade frågor om förvarets utformning analyseras och bedöms och ger underlag till det fortsatta projekteringsarbetet. Se även kapitel 2 för säkerhetsanalys och kapitel 14 för projekteringen av djupförvaret och framtagningen av anläggningsbeskrivningen.



**Figur13-1.** De tre huvudaktiviteterna undersökningar, projektering och säkerhetsanalys, deras huvudprodukter och informationsflöden. Informationsutbytet ställer stora krav på samordning mellan olika huvudaktiviteter och olika platser.

### 13.3 Datahantering och platsbeskrivande modeller

En mycket viktig del i arbetet med att kvalitetssäkra de undersökningar som ska göras och ha spårbarhet i datahanteringen är att upprätta metodbeskrivningar. En metodbeskrivning presenterar metodens utförande vid SKB-arbeten med avseende på funktions- och noggrannhetskrav, vilka informationsmängder som ska produceras och hur dokumentation ska ske.

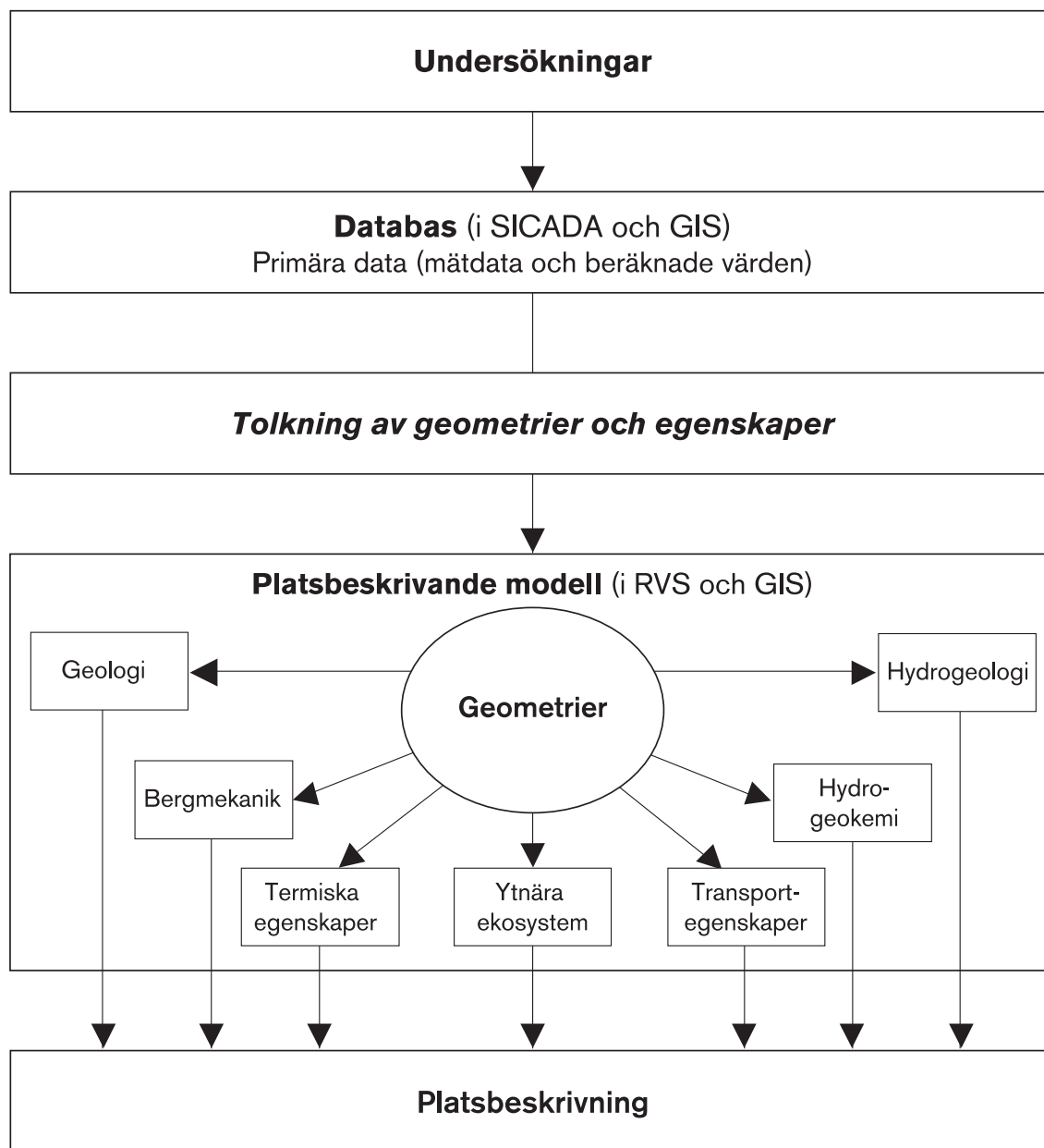
Primära undersökningsdata lagras i platsspecifika databaser i SICADA. Databasens primärdata representerar huvudsakligen parametervärden för enskilda mätpunkter eller begränsade mätobjekt. Till detta har SKB utvecklat ett särskilt datorsystem för att visualisera berggrunden, RVS (Rock Visualisation System) som är ett centralt verktyg vid platsbeskrivande modellering. Den platsspecifika modellen representeras dessutom med geografiska informationssystem (GIS). Databasen SICADA och RVS har utvecklats och använts i samband med undersökningar i Äspölaboratoriet. Det geografiska informationssystemet GIS har använts både i förstudiearbetet och vid Äspölaboratoriet.

Den platsbeskrivande modellen, som en del av utvärderingen av en plats, består av en beskrivning av platsens geometri och olika egenskaper och utgör tillsammans med databaser stommen i platsbeskrivningen /13-3/. Under platsundersökningen analyseras insamlade primärdata och tolkas såväl ämnesspecifikt som integrerat över ämnesområden. Detta görs dels för att kunna dela in platsen i lämpliga geometriska enheter och dels för att ansätta ämnesspecifika egenskaper för dessa enheter. På detta sätt byggs en tredimensionell platsbeskrivande modell av berg och mark. Relationen mellan databas och platsbeskrivande modell illustreras i figur 13-2.

Syftet med att dela upp den platsbeskrivande modellen i olika geometriska enheter är att på ett hanterligt sätt kunna beskriva den rumsliga variationen. De geometriska enheterna väljs så att den rumsliga variationen är begränsad, eller kan beskrivas med relativt enkla statistiska mått, inom enheten. Enheternas utbredning utgår väsentligen från den tolkade geometrin för sprickzoner samt jord- och bergartsfördelning, men även t ex hydrogeologisk information kan användas för att åstadkomma en ändamålsenlig geometrisk indelning. För varje geometrisk enhet beskrivs de geologiska förhållandena, mekaniska, termiska, hydrauliska och hydrogeokemiska egenskaper samt egenskaper av betydelse för transport av lösta ämnen i grundvattnet. Dessutom beskrivs de ytnära ekosystemen. Vad som behöver ingå i den platsbeskrivande modellen och hur detaljerad beskrivningen behöver vara avgörs främst av projekterings behov av att ta fram en anläggningsbeskrivning, säkerhetsanalysens behov av att studera utvecklingen på lång sikt och behovet av att kunna uppnå och visa geovetenskaplig förståelse.

Osäkerheterna i de geologiska modellerna hanteras inom ramen för de platsbeskrivande modellerna enligt ovan. Med tanke på den rumsliga variationen och svårigheten att i detalj bestämma en rimlig geometrisk uppdelning av berget är det väsentligt att inte låsa sig vid ett enstaka modellalternativ, speciellt i ett tidigt karakteriseringsstadium. Alternativa geometriska indelningar eller alternativa värden på modellernas parametrar tas fram och konsekvenserna analyseras. Osäkerheterna som beskrivs i de platsbeskrivande modellerna utgör sedan underlag till säkerhetsanalysen.

Arbetet med de platsbeskrivande modellerna omfattar även att hantera och administrera modellerna, att skapa spårbarhet till data, hantera variabilitet i använda parametrar, att redovisa osäkerheter och hantering av alternativa modeller. En väl fungerande metodik ska underlätta extern granskning av modellerna och de ingående parametrarna samt erbjuda väsentligt förbättrade möjligheter att i olika typer av analyser inkludera parametrarnas beräknade eller bedömda variabilitet.



**Figur 13-2.** Undersökningarnas primärdata samlas i en databas. Data tolkas och presenteras i en platsbeskrivande modell, som består av en beskrivning av platsens geometri och dess olika egenskaper.

För geometrisk modellering initierades en utredning 1999 /13-4, 13-5/. En väsentlig del i detta arbete är hanteringen av modellversioner och dokumentation av hur tolkningar gjorts /13-5/. Detta ska kompletteras med en metod för tolkningen av de geologiska strukturerna och omgivande berg.

Den platsbeskrivande modellen byggs upp i steg. I en första version sammanställs redan tillgänglig geologisk, hydrogeologisk och hydrogeokemisk information med mera. Denna version används sedan som ett av underlagen för planering av fortsatta undersökningsinsatser.



Metodiken för platsbeskrivande modellering ska vidareutvecklas och ytterligare anpassas till de behov säkerhetsanalysen kommer att ha i framtida analyser. I ett första steg vidareutvecklas de rutiner som beskrivs i det generella genomförandeprogrammet för att tolka data och representera osäkerheter i de platsbeskrivande modellerna /R-01-10/. Speciella projekt för att vidareutveckla den platsbeskrivande modelleringen inom ämnesområdena geologi, bergmekanik, hydrogeologi, hydrogeokemi och bergets transportegenskaper pågår. Dessutom kommer speciella insatser att göras för att tydligt precisera hur data från platsbeskrivande modeller ska användas för att få fram indata till säkerhetsanalysens modeller.

### 13.4 Undersökningsmetoder och mätsystem

Undersökningsmetoder och ett generellt genomförandeprogram har presenterats i en rapport /13-3/. Den redovisar en omfattande genomgång av alla tillgängliga undersökningsmetoder samt detaljerade planer för vilka undersökningar som SKB avser att utföra.

En grundprincip för SKB när det gäller undersökningsmetoder och mätinstrument har genom åren varit att i första hand använda befintlig och kommersiellt tillgänglig teknik. Det ofta mycket speciella behovet av information från stort djup har dock gjort det nödvändigt att också bedriva en omfattande egen metod- och instrumentutveckling. SKB:s internationella nätverk, i form av bl a informations- och kunskapsutbyte och gemensamma utvecklingsprojekt, är en annan källa till kunskap.

Bland förberedelserna ingår dokumentation av alla undersökningsmetoder. Upprättandet av metodbeskrivningar är en viktig del i arbetet med att kvalitetssäkra de undersökningar som ska göras och ger spårbarhet i datahanteringen. En metodbeskrivning presenterar bl a metodens utförande vid SKB-arbeten och vilka informationsmängder som ska produceras av metoden.

Berggrunden bör karakteriseras ner till cirka 1,5 gånger det tänkta förvarsdjupet, vilket innebär ner till cirka 1 000 meters djup. Undersökningarna av borrhålen, se figur 13-3, ska kunna genomföras på ett rationellt sätt ner till detta djup. Om det blir aktuellt med



*Figur 13-3.  
Kärnborrning  
på iordningställd  
borrplats.*

djupare borrhål så finns tekniska möjligheter att genomföra undersökningar till cirka 1 500 meter djup, vilket SKB visat med det 1 700 meter djupa borrhålet i Laxemar väster om Simpevarp /13-6/.

Metoder som kommer att användas i platsundersökningarna ska vara beprövade och dokumenterade. Detta hindrar dock på intet sätt nyutveckling av metoder och teknik. Många av de metoder som kommer bli aktuella att använda är sedan länge väl testade och dokumenterade. Andra metoder kräver fortfarande viss utveckling. Nedan beskrivs den fortsatta metod- och instrumentutvecklingen. Genomgången är ingalunda komplett men ger en bild av de viktigaste pågående och planerade arbetena.

### **Reflektionsseismik och VSP**

Seismiska mätmetoder används för att undersöka strukturer i berggrunden. Den reflektionsseismiska metoden har vidareutvecklats för praktisk användning vid platsundersökningar. Såväl mätmetoder som analysmetodik har förbättrats, det senare bl a genom att utnyttja modelleringsverktyget RVS (Rock Visualization System) för att tolka strukturers orientering i tre dimensioner. Undersökningar som genomförts vid Laxemar i närheten av Äspölaboratoriet har visat att metoden fungerar utmärkt för att undersöka berget ner till cirka tre till fyra kilometers djup /13-7/.

De tidigare genomförda metodtesterna har nu kompletterats med VSP (Vertical Seismic Profiling). Inför de inledande platsundersökningarna kommer tillämpningen av VSP att optimeras och samtolkningen av den reflektionsseismiska metoden och VSP att vidareutvecklas.

### **Bergspänningsmätningar**

En grundlig genomgång av bergspänningsmetoder pågår för att öka kunskapen om de olika metodernas mätnoggrannhet och tillämpbarhet för platsundersökningar. De tekniker som används för att mäta bergspänningar baseras på överborrning eller hydraulisk spräckning. Båda metoderna har för- och nackdelar, och mätresultat kan vara behäftade med stor osäkerhet. Som en viktig strategi anser SKB att båda metoderna i största utsträckning ska användas parallellt och att resultaten ska jämföras. Detta har tillämpats i Posivas program för bergspänningsmätningar i Finland. SKB stödjer forskning för integrerad analys av spänningsresultat från olika metoder som en möjlig väg att öka tilltron till mätresultat /13-8/.

En viktig åtgärd för att begränsa osäkerheten i mätresultat är att utveckla kvalitets-säkringsmetoder med syfte att kontrollera om de teoretiska förutsättningarna för metoden (till exempel homogent, elastiskt material) är uppfyllda. Detta kan vara begränsande för tilltron till mätresultat, t ex vid bergspänningsmätning med överborrningsmetoden på stora djup (större än cirka 500–600 meter) där höga spänningar kan orsaka skada i kärnprovet vid överborrning /13-9/. Ett sådant program är initierat, delvis i samarbete med Posiva.

Experiment genomförs vid Äspö under 2001 med en tvådimensionell överborrningsmetod (mäter spänningar vinkelrät mot borrhålet). Denna utvecklades av AECL vid URL, Canada och anses vara en möjligen robustare mätmetod än av SKB vanligtvis använda tredimensionella metoder, eftersom den bedöms som mindre känslig för s k core discing. Jämförande mätning görs med tredimensionell metod.

En inventering av bästa teknik för hydraulisk spräckning i borrhål (76 mm) pågår. Relativt nya resultat styrker /13-10/ den tidigare bedömningen att det är svårt att mäta största horisontalspänningen med hydraulisk spräckning. Trots metodens begränsningar bedöms den som mest tillförlitlig för att karakterisera spänningsfältet på större djup (större än cirka 600 meter).

### **Uppbyggnad av GPS-nät för studie av långsamma bergrörelser**

GPS (Global Positioning System) är ett satellitbaserat navigations- och positionsbestämningssystem. Med hjälp av GPS kan långsamma bergrörelser studeras.

I syfte att studera metoden har ett lokalt GPS-nät etablerats i Laxemarområdet. Fyra mätningar har genomförts och återkommande mätningar kommer att göras. Inför starten av platsundersökningarna kommer ytterligare GPS-nät att byggas upp i Östhammars och Tierps kommuner. Näten etableras inom en yta av cirka 15 x 15 km och kommer i första hand att användas för att studera rörelser i regionala sprickzoner. Rörelser av storleksordningen 1 mm per år kommer att kunna uppskattas med tillräcklig noggrannhet efter två till tre års mätningar.

### **Uppbyggnad av seismologiskt nät**

Seismologiska mätningar utförs för att övervaka skalv i berggrunden. Uppsala Universitet driver för närvarande 18 seismologiska stationer i Sverige, varav tolv stationer är placerade längs Norrlandskusten från Gävle i söder till Luleå i norr, se även avsnitt 8.2.7. Inför starten av platsundersökningarna kommer ytterligare 20 seismologiska stationer att byggas längs Östersjöns kust från Östhammar i norr till Oskarshamn i söder. Ett par stationer placeras med tätare avstånd i de tre kommunerna Östhammar, Tierp och Oskarshamn med syfte att kunna detektera små skalv.

Utbyggnaden av det seismologiska nätet genomförs redan under 2001 för att stå klart vid tidpunkten för start av platsundersökningarna. Efter fältkontroller träffas överenskommelse med markägare om utplacering av de seismiska stationerna.

### **Borrteknik och mätning under borrning**

Ett 1 000 meter djupt kärnborrhål har borrats i SKB:s instrumentförråd, i anslutning till Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Hålet är till för provning av utrustning. Under borrning av hålet provades själva borrtekniken, hantering av borkärnor och mätmetoder som kan användas i samband med borrning. Bl a testades och modifierades en ny metod för vattenprovtagning och hydrauliska tester under borrning.

Borrhålet kommer framöver att användas för metodtester och i utbildningssyfte.

### **Metodik för kalibrering av längd i borrhål**

Osäkerheten i längdmätning vid borrhålmätningar är förhållandevis stor i relation till de krav som ställs för samutvärdering av olika typer av mätdata. För att komma tillrätta med detta har en metodik för kalibrering av längd i borrhål för korrekt positionering av mätpunkter testats och utvecklats. Metodiken innebär att man placerar märken vid kända borrhållängder och att märkena sedan detekteras i samband med borrhålsundersökningar. Metodiken kommer inför platsundersökningarna att implementeras för relevanta borrhålsmetoder.

## **Hydrogeologiska metoder**

SKB genomför tillsammans med Posiva ett mätprogram för test och eventuell vidareutveckling av deras flödesloggningsmetod (Posiva Flow Log) med vilken vattenströmningen på olika nivåer i ett borrhål mäts. Den metod Posiva har utvecklat mäter inflödet till borrhålet i en sektion, till skillnad från traditionella system som mäter utan sektion och alltså ger ett sammanlagt flöde i borrhålet.

Syftet med mätprogrammet är att undersöka instrumentets förmåga att bestämma transmissivitet och naturligt tryck hos de flödande sprickor som har identifierats och dessutom att testa mättekniken i syfte att formulera ett lämpligt testprogram för platsundersökningarna. Ambitionen är även att kunna mäta den elektriska konduktiviteten i enskilda sprickor.

Mätningarna sker i det djupa borrhålet vid Laxemar, där det är av särskilt intresse att undersöka metodens förmåga att hantera de höga salthalter som förekommer på större djup.

Samarbetet med Posiva omfattar även test av vattenprovtagare i samma borrhål. Resultatet från denna test har redan kommit till nytta för det nya vattenprovtagningssystem som håller på att tas fram.

## **Borrhålsradar**

SKB har identifierat ett behov av att ersätta det gamla borrhålsradarsystemet RAMAC med ett nytt motsvarande system inför de planerade platsundersökningarna. Till sommaren 2000 färdigställdes ett nytt borrhålsradarsystem med 20, 100 och 250 MHz dipolantennor. Under hösten och vintern 2000 utfördes en teoretisk studie och verifierande fälttester angående riktantennens funktion. Sammanfattningsvis har dessa analyser bekräftat att riktantennen fungerar i dess nuvarande utformning, men att dess funktion under vissa omständigheter kan förbättras. Till början av 2002 kommer befintligt system att kompletteras med en riktantennfunktion med tillhörande programvaror.

## **Mobil kemienhet**

I SKB:s mobila system för undersökningar av grundvattenkemi ingår slangvagnar och mobila kemilaboratorier. Slangvagnarna innehåller de anordningar som krävs för att pumpa upp provvatten från avgränsade sektioner i ett borrhål samt för att genomföra mätningar av kemiska parametrar i borrhålssektionen och i flödescell på markytan. Kemilaboratorierna innehåller instrument för provtagning och analys av det uppumpade sektionsvattnet.

För kommande platsundersökningar kommer två mobila system att behövas. Under år 2001 kommer en ny slangvagn med tillhörande ny borrhålsutrustning att färdigställas. I arbetet ingår bl a att ta fram en ny kemisond för in situ-mätning av kemiska parametrar i avgränsade sektioner i borrhål och en ny provtagare för provtagning av trycksatt sektionsvatten.

## **Mätning av bergets transportegenskaper**

Flertalet av de transportparametrar som används i platsundersökningsskedet är generiska och bestämda genom tidigare försök på olika bergmaterial, i fält och på laboratorier. För att platsanpassa generiska data görs en bedömning om platsens bergartssammansättning

och hydrogeokemiska tillstånd motsvarar förhållandena som gäller för generiska data. Dessutom utförs vissa kompletterande, platsspecifika undersökningar. Ämnesrådets karakteriseringsmetoder återges i sin helhet i /13-3/.

En metod som för närvarande studeras är att använda resistivitetsloggningar i borrhål för att bestämma matrisdiffusivitet på liknande sätt som gjorts i laboratorieförsök. Metoden är under utveckling. Fördelen är att datainsamlingen går snabbt samt att man får en rumslig fördelning av diffusivitetsdata.

Grundvattenflödesmätningar genomförs i ett flertal borrhålssektioner under olika skeden i platsundersökningen. Det finns för närvarande två olika koncept för mätningar av grundvattenflöde. SKB och Posiva har utvecklat varsin metod för loggning av grundvattenflödet i djupa borrhål. SKB:s metod bygger på utspädningen av ett tillsatt spårämne medan Posiva:s metod mäter flödet med en termisk metod. En jämförande studie pågår. Erfarenheter från experiment i Äspölaboratoriet (TRUE Block Scale) visar att flödesmätningar ger värdefull information om konnektivitet och geometri för hydrauliska strukturer genom att göra kontrollerade tryckstörningar och mäta förändringar i grundvattenflödet.

Spårämnesförsök i ett borrhål utförs genom att injicera en spårämnespuls med ett övertryck, låta den vara i kontakt med sprickytorna under en kortare tid och slutligen åter pumpa tillbaks spårämneslösningen. En fördel med denna metod är att den inte är beroende av flera borrhål som skär samma geologiska struktur, vilket kan vara avgörande då borrhålen i allmänhet är placerade relativt långt ifrån varandra. Metoden ger in situ värden på dispersivitet och flödesporositet. Data från sådana försök kan även användas för skattningar av den våta ytan samt sorptionsparametrar för ett urval av svag- till medelsorberande ämnen. En utvärdering av potentialen hos metoden pågår inom TRUE-projektet vid Äspölaboratoriet. Erfarenheterna av denna metodik för att bestämma dispersivitet, flödesporositet, matrisdiffusivitet och sorptionskoefficienter är goda inom andra platsundersökningsprogram såsom WIPP i USA /13-11/ och Leuggern i Schweiz /13-12/.

## 13.5 Långtidsobservationer

Kontinuerliga eller periodiskt återkommande observationer och mätningar – långtidsobservationer (monitering) – är en naturlig aktivitet vid genomförande av ett djupförvar.

Långtidsobservationerna har ett flertal, ibland överlappande syften, nämligen att:

- Etablera kunskap om ostörda förhållanden i naturen och dess säsongsvariationer för att identifiera och utvärdera den påverkan djupförvaret får under olika skeden.
- Stärka förståelsen av djupförvarssystemets funktion för att stödja säkerhetsredovisningen och för att pröva modeller och antaganden.
- Kontrollera djupförvarets miljöpåverkan och säkra att ingen radiologisk påverkan sker.
- Kontrollera att arbetsmiljön är säker med hänsyn till radiologiska och icke radiologiska effekter.
- Visa att krav på kontroll av avfall (safeguards) uppfylls.

Det stegvisa genomförandet av ett djupförvar medför en gradvis ökad förståelse av platsen och dess egenskaper. I översiktstudier, förstudier och platsundersökningar sammanställs vetenskapligt och tekniskt underlag om platsen och dess historiska utveckling. Mätningar i samband med platsundersökningsskedet ger ostörda, lokala data med dess säsongsvariationer.

I detaljundersökningsskedet sker en störning genom grundvattensänkning och störningen används för att detaljera de vetenskapliga modellerna av biosfär och berggrund. I detaljundersökningsskedet genomförs också kontrollprogram för att visa att miljöpåverkan av anläggningen är inom de ramar som är fastställda i lokaliseringstillståndet.

Under den inledande driften löper kontrollprogram för förståelse av platsen och dess egenskaper, för kontroll av arbetsmiljö och yttre miljö vidare som tidigare. Dessutom sker radiologiska kontroller och man har system som uppfyller krav på kontroll av kärnämnen (safeguards).

Efter full utbyggnad och förslutning av förvaret kommer säkerligen kontrollprogram för miljö att fortsätta under ett antal decennier. Därutöver finns det flera möjliga mätningar och observationer att göra om kommande generationer så finner det vara önskvärt. En viktig punkt är att all information om djupförvaret bevaras.

Metoder och tekniker för långtidsobservationer finns tillgängliga. AECL har gjort en översikt av dessa /13-13/ och drar slutsatsen att dagens tekniska metoder är tillräckligt bra för sina syften, men att ytterligare utveckling kan öka känslighet i metoder, sänka kostnader samt snabba upp analys och spridning av data.

Vid Äspölaboratoriet genomför SKB observationer som en basverksamhet med syfte att utgöra stöd till de experimentprojekt som bedrivs där. Observationer av grundvatten (tryck och grundvattenkemisk karakterisering) har bedrivits under förundersöknings-, konstruktions- och driftskedet, se avsnitt 12.4.

SKB planerar att genomföra följande aktiviteter avseende långtidsobservationer under den kommande sexårsperioden:

- Upprätta en SKB-policy för långtidsobservationer.
- Inom ramen för platsundersökningar påbörja observationer, mätningar inom Oskarshamn, Tierp och Östhammars kommuner med syfte att erhålla det initiala tillståndet och säsongsvariationer.
- Utarbeta preliminära program för återkommande observationer och mätningar under detaljundersökningsskedet och inledande drift.
- Följa den internationella utvecklingen för behov av institutionell kontroll och långtidsobservationer efter förslutning.

Tabell 13-1 ger en översikt över tänkbara behov av kontinuerliga och periodiska observationer och mätningar av SKB:s djupförvar för olika skeden.

**Tabell 13-1. Möjligt behov av kontinuerliga och periodiska observationer och mätningar i olika skeden.**

<b>Platsundersökningsskedet</b>	<b>Detaljundersökningsskedet</b>	<b>Inledande drift, reguljär drift, förslutning</b>	<b>Efter förslutning</b>
<b>Kontrollprogram för miljö</b> – störning av markundersökningarna	<b>Kontrollprogram för miljö</b> – störning av kompletterande markundersökningar – inverkan av utbyggnad av anläggningen (mark, grundvatten, gas, buller)	<b>Kontrollprogram för miljö</b> – störning av kompletterande markundersökningar – inverkan av utbyggnad av anläggningen (mark, grundvatten, gas, buller)	<b>Kontrollprogram för miljö</b> – inverkan av grundvattenhöjning  <b>Dokumentation bevaras</b>
<b>Klimat</b> – temperatur, atmosfärstryck, nederbörd, avdunstning, avrinning, havsnivåförändringar	<b>Klimat</b> – temperatur, atmosfärstryck, nederbörd, avdunstning, avrinning, havsnivåförändringar	<b>Klimat</b> – temperatur, atmosfärstryck, nederbörd, avdunstning, avrinning, havsnivåförändringar	<b>Klimat</b> – temperatur, atmosfärstryck, nederbörd, avdunstning, avrinning, havsnivåförändringar
<b>Biosfär</b> – flora, fauna, jordlager, markutnyttjande m m	<b>Biosfär</b> – flora, fauna, jordlager, markutnyttjande m m	<b>Biosfär</b> – flora, fauna, jordlager, markutnyttjande m m	<b>Biosfär</b> – flora, fauna, jordlager, markutnyttjande m m under något decennium <b>Dokumentation bevaras</b>
<b>Borrhål från markytan</b> – grundvattenkemi, -tryck, temperatur	<b>Borrhål från markytan</b> – grundvattenkemi, -tryck, temperatur	<b>Borrhål från markytan</b> – grundvattenkemi, -tryck, temperatur	<b>Dokumentation bevaras</b>
		<b>Borrhål från bergutrymmen</b> – grundvattenkemi -tryck, temperatur – deformationer i berget	<b>Dokumentation bevaras</b>
<b>Seismiska och aseismiska händelser</b> – tid, läge och typ av lokala skalv – långsamma deformationer	<b>Seismiska och aseismiska händelser</b> – tid, läge och typ av lokala skalv – långsamma deformationer	<b>Seismiska och aseismiska händelser</b> – tid, läge och typ av lokala skalv – långsamma deformationer	<b>Dokumentation bevaras</b>
	<b>Övervakning av anläggningen</b> – brand – översvämningar – inläckande vatten per anläggningsdel – utpumpat vatten (mängd, kvalitet) – ventilation (temperatur, mängd, kvalitet) – buller – tillståndsmätningar för förebyggande underhåll	<b>Övervakning av anläggningen</b> – brand – översvämningar – inläckande vatten per anläggningsdel – utpumpat vatten (mängd, kvalitet) – ventilation (temperatur, mängd, kvalitet) – buller – tillståndsmätningar för förebyggande underhåll – kontroll av strålning – kontroll av avfall (safeguard)	<b>Övervakning av anläggningen</b> – kontroll av avfall (safeguard)  <b>Dokumentation bevaras</b>





## 14 Djupförvaret

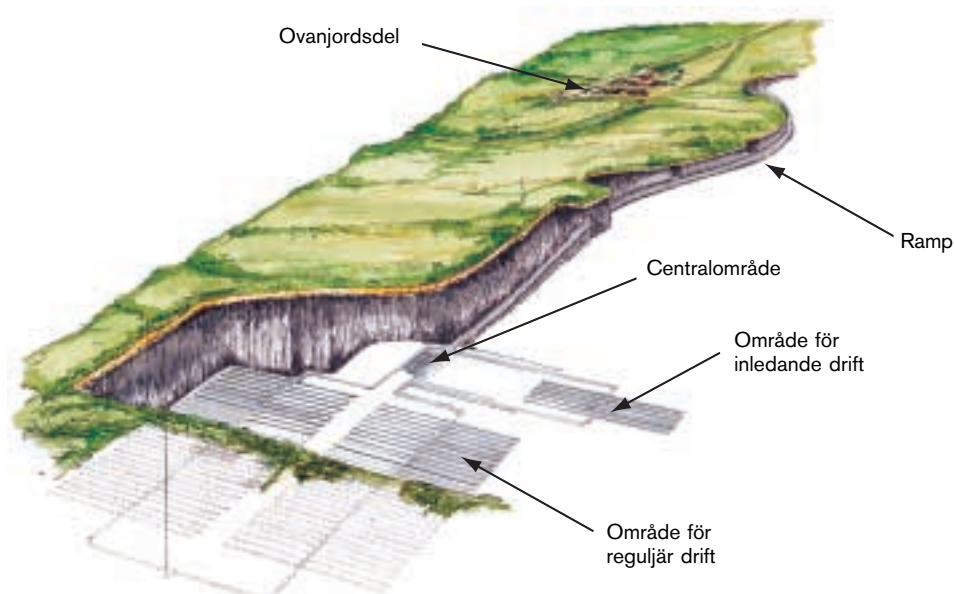
Anläggningen för djupförvaring av använt bränsle består av en ovanjordsdel och en underjordsdel som är förbundna med varandra med en ramp och/eller ett schakt, se figur 14-1.

Underjordsdelen förläggs på ett djup av 400–700 meter där de mekaniska och kemiska förhållandena är stabila. Under jord finns ett centralområde, områden för deponering av bränsle för inledande drift och deponeringsområden för reguljär drift.

Projekteringen och utbyggnaden av djupförvaret sker stegvis. Förstudier för lokalisering har avslutats och närmast planerar SKB att inleda platsundersökningar. Därefter följer detaljundersökning med inledande byggnation av djupförvaret, inledande drift, reguljär drift samt förslutning av djupförvaret.

Miljöpåverkan från djupförvaret utreddes preliminärt i samband med förstudierna /14-1 till 14-8/. En icke platsspecifik preliminär beskrivning av markbehov, utformning av byggnader, transportsystem med mera återfinns i SKB:s systemanalys /14-9/. Omfattningen av miljöpåverkan beror bl a på mängden uttaget berg och omfattningen av ny infrastruktur.

Valet av olika lösningar som till exempel schakt och/eller ramp liksom placeringen av djupförvarets bergrum och tunnlar i förhållande till varandra och till ovanjordsdelen beror bl a av förutsättningarna på den valda platsen. Valet av nedfart och dess placering fastställs i platsundersökningsskedet, medan detaljerad utformning av deponeringsområden bestäms först när det finns kunskaper från detaljundersökning. En detaljerad miljökonsekvensbeskrivning kommer att presenteras i samband med att SKB ansöker om lokaliseringstillstånd.



*Figur 14-1. Principutformning av djupförvaret med en rak ramp från ovanjordsdelen till underjordsdelen.*

Detaljundersökningsskedet sträcker sig i tiden från godkänt tillstånd för lokalisering fram till dess att tillstånd erhållits för inledande drift. I detaljundersökningsskedet byggs djupförvaret ut till fullt förvarsdjup och bergutrymmen anläggs parallellt med detaljerade undersökningar av berget. Den platsbeskrivning som upprättats i platsundersökningsskedet utvecklas och detaljeras. Undersökningarna i detaljundersökningsskedet ger nödvändigt och tillräckligt underlag för att anpassa djupförvaret till platsens förutsättningar och upprätta slutlig säkerhetsrapport för den inledande driften. Förutom arbete med underjordsdelen, bygger SKB ut anläggningar ovan mark under detaljundersökningsskedet. System för transporter ovan jord etableras.

Under den inledande driften planeras deponering av 200–400 kapslar med använt kärnbränsle. Detta arbete ska enligt SKB:s långsiktiga planer påbörjas omkring år 2015. Innan beslut fattas om fortsatt utbyggnad och deponering utvärderas erfarenheterna från det första steget och nytillkommen kunskap i övrigt. Om utvärderingen ger stöd för fortsatt utbyggnad av djupförvaret sker fortsatt utbyggnad och deponering under cirka 40 år. Därefter försluts djupförvaret. Efter förslutningen är det möjligt att återställa platsen till ett skick som är likt det ursprungliga.

## **14.1 Myndigheternas synpunkter på FUD 98**

SKI redovisade under 1999 synpunkterna på FUD-program 98 /14-10, 14-11/. Nedan följer en sammanfattning av några viktiga synpunkter samt SKB:s kommentarer till dem.

SKI önskar att SKB senast vid en tillståndsansökan visar att funktionskraven på djupförvaret kan fyllas. SKB bör tänka igenom strukturen på denna redovisning och hur kraven stegvis utvecklas mot allt mer detaljerade krav och mål för utvecklingsarbetet efterhand som beslutsprocess och byggande av anläggningar fortskrider. SKI menar också att man tydligare bör ta upp frågan om variationsbredd eller handlingsfrihet i djupförvarsutformningen samt att det inte bara är i sin ordning utan också nödvändigt att viss variationsbredd ingår i tillståndet.

SKB har inlett arbete med konstruktionsförutsättningar och metoder för acceptansprövning. Arbetet har hög prioritet i SKB:s planering, det redovisas mer i detalj i avsnitt 14.2 samt avsnitt 14.3. Liksom SKI anser SKB att allt mer detaljerade krav samt metoder och kriterier för acceptansprövning bör tas fram i en stegvis process. Även vad gäller handlingsfrihet och variationsbredd instämmer SKB i SKI:s synpunkter. SKB önskar en dialog med myndigheterna om vad som kan anses vara tillräckligt inför de olika beslut som ska tas i framtiden. Häri ingår också att tydliggöra hur den stegvisa förvarsutformningen genomförs samt hur variationsbredd och handlingsfrihet successivt begränsas.

SSI anger i sina föreskrifter att bästa möjliga teknik ska tillämpas för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen och utsläppens skadliga effekter samt att optimering i syfte att begränsa stråldoser till människor ska göras så långt möjligt med hänsyn till ekonomiska och samhällsliga faktorer. SKB förutsätter en dialog med myndigheterna om hur bästa möjliga teknik och optimering ska tillämpas i projekteringen. Mer detaljerade planer återfinns i avsnitt 14.3.

## 14.2 Konstruktionsförutsättningar, acceptansprövning och optimering

### 14.2.1 Konstruktionsförutsättningar

För att kunna utforma djupförvaret sammanställs och prioriteras de olika krav som ställs på djupförvaret och dess delar. Nuvarande konstruktionsunderlag finns i flera dokument framtagna av olika specialister och arbetsgrupper i olika sammanhang. Avsikten är nu att på ett strukturerat sätt sammanställa befintligt konstruktionsunderlag i ett dokument. Med konstruktionsförutsättningar avses de krav och andra villkor som bestämmer hur djupförvarets olika delar ska utformas.

Konstruktionsförutsättningarna avser ett djupförvar för det använda kärnbränslet från det svenska kärnkraftsprogrammet. De avser ett förvar utformat enligt KBS-3-metoden och utgår från att denna strategi och metod på en övergripande nivå uppfyller lagens krav på ett djupförvar. Konstruktionsförutsättningarna ska beakta byggande och drift liksom den långsiktiga säkerheten efter förslutning och omfattar preliminärt:

- Kapsel.
- Buffert.
- Deponeringshål.
- Deponeringstunnlar.
- Övriga bergrum (ramp, transporttunnlar, hiss- och ventilationsschakt).
- Tätningar och förstärkningar av sprickor och svaghetszoner.
- Pluggning av deponeringstunnel.
- Återfyllnad.

Utgångspunkten för konstruktionsförutsättningarna är samhällets krav på säkerhet och skydd av människor och miljö såsom de uttrycks i svensk lagstiftning och internationella överenskommelser. Det använda bränslets egenskaper, teknisk genomförbarhet och ägarnas önskemål är andra faktorer som påverkar konstruktionsförutsättningarna. Den sammanställning av konstruktionsförutsättningar som nu genomförs utgår från de funktionskrav på djupförvaret och dess delar som redovisas i FUD-program 98 /14-12, 14-13/. Utifrån dessa krav och en genomgång av de påfrestningar djupförvaret och dess delar utsätts för i olika sammanhang kan detaljerade konstruktionsförutsättningar formuleras.

Konstruktionsförutsättningarna är en utgångspunkt för konstruktionsarbetet och uttrycker t ex vilka statiska belastningar, deformationer eller halter av korrosiva ämnen respektive del i djupförvaret ska dimensioneras för att tåla. Konstruktionsförutsättningarna grundar sig på den samlade kunskap och information som finns om djupförvaret och dess säkerhet. Resultat från forskning, utveckling, demonstration och undersökningar av berggrunden bidrar till att öka kunskapen och därmed förutsättningarna för att formulera konstruktionsförutsättningar, vilka successivt kan komma att modifieras.

Arbete med att ta fram en första sammanställning av konstruktionsförutsättningar pågår. Sammanställningen baseras på den kunskap och information som finns tillgänglig idag. Vad gäller den långsiktiga säkerheten utgår den från SR 97 /14-14/ och den sammanställning av kunskapsläget som ingår som en underlagsrapport till säkerhetsanalysen /14-15/.

SKB har dessutom tagit fram och redovisat krav på berget /14-16/ samt ett program för geovetenskaplig undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret /14-17/. Vidare har konstruktionsförutsättningar för kapseln redovisats /14-18/. Dessa dokument ingår också som underlag för konstruktionsförutsättningarna.

Separata konstruktionsförutsättningar tas även fram för service- och kringanläggningar ovan jord samt utrustning som krävs för byggande och drift under jord.

### **14.2.2 Acceptansprövning**

I arbetet med konstruktionsförutsättningarna fastslås vilka krav som ställs på djupförvarets olika delar. Acceptansprövning syftar till att avgöra om konstruktionsförutsättningarnas krav kan anses uppfyllda. De acceptanskriterier som formuleras är kopplade till den valda metoden för acceptansprövning. Med konstruktionsförutsättningar, acceptanskriterier och metoder för acceptansprövning avser SKB redovisa hur funktionskrav och andra krav kan uppfyllas. SKB förutser en dialog med myndigheterna om vad som kan anses tillräckligt och nödvändigt inför kommande beslut.

Ett exempel är konstruktionsförutsättningar för deponeringshål. Som en detalj ingår att redovisa metodik för hur en deponeringsposition accepteras eller förkastas. För att kunna tillgodogöra sig vunnit erfarenhet från Aspölaboratoriet och platsundersökningarna förutser SKB att framtagning av acceptanskriterier och metoder för acceptansprövning kan ske stegvis parallellt med utformning, optimering och fördjupad kunskap om den aktuella platsen.

### **14.2.3 Optimering och motiv för vald utformning**

I nuläget anser SKB att en variationsbredd och handlingsfrihet i förvarsutformningen är nödvändig. Som framgår av avsnitt 14.1 delar myndigheterna denna uppfattning. SKB avser att inom sexårsperioden noggrannare redovisa metodik för förvarsoptimering och också hur vi systematiskt, stegvis minskar antalet alternativ. Den systematiska och stegvisa minskningen av alternativ är en naturlig ingrediens i SKB:s projekteringsmodell, men SKB inser behovet av ökad transparens i detta avseende.

Med optimering avses analys av väl avgränsade problem i syfte att finna den mest optimala lösningen. Aspekter som bör analyseras och värderas är:

- Långsiktig säkerhet efter förslutning.
- Säkerhet under drift.
- Säkerhet under byggande.
- Miljö.
- Teknik och genomförbarhet.
- Ekonomi.

I vissa fall kan även möjligheter till återtag vara en optimeringsparameter. Exempel på frågor där behov av optimeringsstudier kan finnas är: tillträde till förvarsdjup genom schakt eller ramp; förvar i ett eller två plan; teknik och material för återfyllnad; teknik för sprängning och borrar samt alternativa deponeringsmetoder.

I konstruktionsförutsättningarna anges vilka krav som ställs på djupförvaret och dess delar. I de allra flesta fall kan kraven uppfyllas genom alternativa tekniska lösningar. SKB avser att successivt redovisa motiv för val av utformning, material och utförandemetoder. Resultaten från optimeringsstudierna utgör grunden för motiveringen av den valda utformningen. Den valda tekniska lösningen kan både påverka och påverkas av arbetet med att ta fram acceptanskriterier och metoder för acceptansprövning.

#### **14.2.4 Utvecklingsprogram**

En första utgåva av konstruktionsförutsättningarna planeras att redovisas under 2002. Konstruktionsförutsättningar kommer därefter att utvecklas och detaljeras successivt. I slutet av den kommande sexårsperioden ska de konstruktionsförutsättningar som krävs inför detaljundersökningsskedet ha tagits fram.

Konstruktionsförutsättningar, acceptanskriterier och metoder för acceptansprövning samt optimering och motiv för vald utformning är kopplade till varandra. I samtliga fall ser SKB en successiv detaljering av underlaget. Det bör poängteras att platsspecifika faktorer kan påverka såväl analys som värdering.

SKB avser att – i dialog med myndigheterna – utveckla metodik för platsanpassning och optimering av djupförvaret. Motiv för utformningen, materialval och val av utförandemetoder kommer successivt att redovisas.

### **14.3 Projektering**

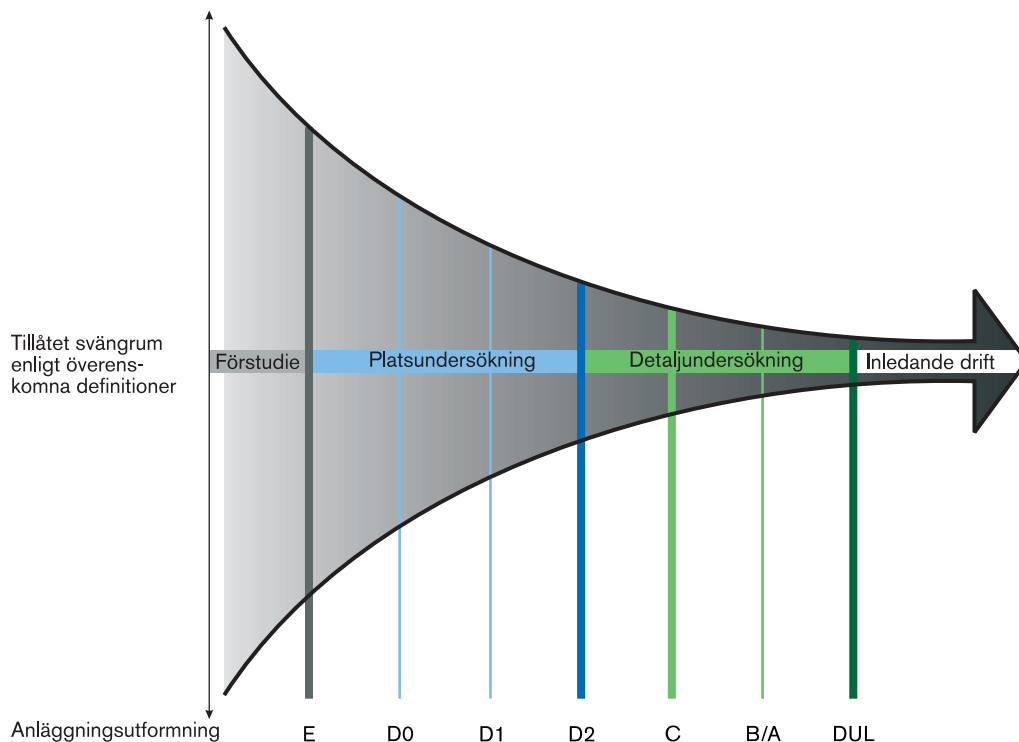
Projektering är en samlingsterm för den aktivitet där tekniskt underlag samlas, bearbetas och analyseras för att så småningom kunna omsättas till anläggningsbeskrivning, funktionsbeskrivningar, bygghandlingar och konstruktionsritningar. I projekteringsarbetet ingår att ta fram kriterier och metoder för acceptansprövning, optimering vad gäller säkerhet, miljö, teknik och ekonomi samt motiv för valet av utformning och/eller teknik. Projekteringen kan inte drivas separat utan måste samordnas med platsundersökningar samt system- och säkerhetsanalys, vilket även framhålls av SKI i granskningen av FUD-program 98 /14-11/.

Nedan redovisas den planerade projekteringen av djupförvaret. Arbetet med kapsel och inkapslingsanläggning samt transporter till djupförvaret redovisas separat.

Projekteringen av djupförvaret utgår från konstruktionsförutsättningarna och tillgänglig information om förvarsplatsen. Konstruktionsförutsättningar redovisas för djupförvaret, service- och kringanläggningar, försörjningssystem, maskiner och fordon. Djupförvarets utformning – layout – bestäms dels av förhållandena på förvarsplatsen, dels av icke platsspecifika faktorer som t ex krav på att utrustning och installationer ska rymmas.

#### **14.3.1 SKB:s projekteringsmodell**

SKB använder en stegvis projekteringsmodell för djupförvaret. Utformningen förfinas och dokumenteras stegvis i takt med att ökad kunskap erhålles och systemet successivt byggs ut. Den stegvisa detaljeringen och utbyggnaden ger en successiv begränsning av handlingsutrymmet för förändringar, vilket illustreras i figur 14-2. De delar som byggs tidigt bör utformas så att rimlig handlingsfrihet bibehålls för de delar som detaljprojekteras och byggs i senare skeden.



**Figur 14-2.** SKB:s projekteringsmodell innebär att handlingsutrymmet gradvis begränsas.

Projekteringen är indelad i skeden /14-9/ och följer den plan som tagits fram inför tidigare FUD-program /14-19/. Under de två inledande skedena – benämnda E respektive D – sker en samlad projektering av hela djupförvaret. Under de efterföljande projekterings- och konstruktionsskedena – benämnda C, B/A respektive DUL – detaljprojekteras ovanjordsanläggningar, delar av djupförvaret samt försörjningssystem, maskiner och fordon i den ordning de byggs och tas i drift. De är av naturliga skäl markarbeten för industri- och driftområden samt tillträde till djupförvaret genom schakt och/eller ramp som byggs ut i ett första skede. Detaljprojektering av byggnader ovan jord, byggande av övriga bergtrum, utformning av försörjningssystem samt system och utrustningar för hantering av det radioaktiva avfallet kan ske senare och anpassas till kunskap och erfarenheter som är tillgängliga då.

Anläggningsutformningen av djupförvaret, det vill säga layout av underjordsanläggning samt utformning av ovanjordsanläggningar ges samma beteckningar som de olika projekteringskedena. Projektering av tekniska försörjningssystem, maskiner och fordon sker parallellt med anläggningsutformningen. Utformningen av djupförvarets bergtrum kan anpassas till den tekniska utrustning de ska rymma och vice versa. Varje fastställd anläggningsutformning begränsar därför möjlig utformning av försörjningssystem, maskiner och fordon och vice versa.

Även om detaljerad projektering planeras ske stegvis, del för del av djupförvaret, är det nödvändigt att varje anläggningsutformning omfattar hela djupförvaret. Utformningen av varje enskild del beror av och måste anpassas till, utformningen av övriga komponenter i djupförvaret. Vid utformning av tillfart till djupförvaret måste t ex hänsyn tas till möjliga alternativa utformningar av återstående delar av djupförvaret, försörjningssystem, maskiner och fordon. Det betyder att de delar som planeras uppföras sent måste projekteras preliminärt i ett tidigt skede för att ge underlag för detaljutformningen av tidigt byggda delar.

### **14.3.2 Anläggningsutformning**

#### **Projekteringskede E**

Skede E har avslutats under 2001. En anläggningsbeskrivning med ritningar som redovisar anläggningens funktion, storlek och omfattning är upprättad. Beskrivningen är generell och inte anpassad till en specifik plats. Den syftar till att ge en tydlig bild av vad etablering av ett djupförvar innebär och utgör ett underlag för att ta fram platsanpassade anläggningsbeskrivningar i skede D.

#### **Projekteringskede D**

Skede D påbörjas när platsundersökningarna inleds och syftar till att ge erforderligt underlag för val av plats för detaljundersökning. Skede D delas upp i stegen D0, D1 och D2. Varje steg av mer detaljerad layout i skede D är en del av underlaget för undersökningsprogrammet i platsundersökningskedet. D0 och D1 utgör också underlag för tidiga samråd, medan D2 ger underlag för MKB, system- och säkerhetsanalys.

Under hela skede D är aktiviteterna undersökningar, projektering och optimering kopplade. När nya data tas fram och tolkas revideras beskrivningen av förvarsplatsen. Djupförvarets layout anpassas till platsmodellen varpå den utvärderas med avseende på säkerhet, miljö och övriga optimeringsparametrar. Resultaten från utvärderingen utgör ett underlag för de fortsatta platsundersökningarna.

Layout D0 baseras på de första platsspecifika geovetenskapliga beskrivningarna. D0 tar hänsyn till tidigt identifierade sprickzoner samt bergets termiska och mekaniska egenskaper. Layout D0 syftar till att utreda om erforderlig bergvolym finns på platsen samt om platsen i övrigt är lämplig från miljösynpunkt.

Layout D1 upprättas utifrån en preliminär platsmodell baserad på borrhålsinformation som erhålls vid den inledande platsundersökningen. Den innehåller en första platsanpassad anläggningsbeskrivning. Layout D1 planeras användas för att göra en preliminär säkerhetsbedömning.

Parallellt med den platsspecifika projekteringen planeras icke platsspecifika utredningar av bl a utrustning och teknik för hantering av bentonit, deponering av kapslar samt återfyllning av deponeringstunnlar och bergrum. Fördjupade utredningar genomförs av drivningsmetoder för tillredning av ramper, schakt och transport- och deponeringstunnlar samt om förvaret bör byggas i ett plan, enligt huvudalternativet, eller om det ska delas upp i två plan. Vidare analyseras konsekvenserna av förlängd drifttid och förlängt öppethållande av förvaret. I layout D0 och D1 läggs platsspecifika data till och resultaten från de generella studierna berikas med platsspecifik information.

Layout D2 är underlag för de dokument som krävs vid ansökan om tillstånd för djupförvarets lokalisering och utbyggnad. D2 innehåller en fördjupad platsanpassning och bearbetning av anläggningens utformning med hänsyn till resultat från de generella studierna samt erfarenheter från Äspölaboratoriet. Layout D2 ger gränser för anläggningens placering i plan och djupled. Lägen av tillfart till djupförvaret genom ramp och/eller schakt fixeras.

### **Projekteringsskede C**

Layout C är grunden för detaljprojektering och framtagning av underlag till ansökan om bygglov för de delar av djupförvaret som byggs ut först, dvs markarbeten för ovanjordsanläggningen samt nedfart till djupförvaret. Layout C baseras på layout D2 och tillgängliga förutsättningar vad gäller utformning av försörjningssystem, maskiner och fordon.

Under detta skede planeras en uppdatering av underlag och detaljplanering av utbyggnaden för den inledande driften. Resultatet av de speciella utredningar som genomförts, till exempel för deponeringsutrustning, återfyllning, pluggning, drivning och passage av vattenförande zoner inarbetas i utformningen. Industriområdet ovan jord detaljanpassas till terrängen och infrastruktur på platsen. Anläggningen utformas i samråd med kommun och sakägare och godkänns av berörda myndigheter.

### **Projekteringsskede B/A**

Layout B är en slutligt fastställd planlösning för anläggningsdelar såväl ovan som under jord. I detta skede tas definitiva kravspecifikationer på hanteringssystemen för det radioaktiva avfallet fram. Anläggnings- och funktionsbeskrivningen detaljeras och säkerhetstekniska driftförutsättningar redovisas. Vidare beskrivs metoder och teknik för eventuellt återtag av det deponerade bränslet. Konsekvenser av samtidig deponering och utbyggnad av djupförvaret belyses. Eventuellt sker fördjupad utredning av konsekvenser av förlängt öppethållande.

För delar av anläggningen som innehåller konstruktioner där komplexiteten är stor, till exempel samordning och anpassning av ventilation, försörjningssystem och deponeringsutrustning kan ytterligare en anpassning av layouten benämnd A behöva utarbetas.

### **Definitivt underlag (DUL)**

Projekteringsarbetet avslutas med att ett definitivt underlag (DUL) tas fram. Under detta skede levereras slutgiltiga detaljuppgifter för att kunna färdigställa arbetshandlingar, installations- och relationsritningar. Definitiva systembeskrivningar för försörjningssystemen, hanteringsutrustningar, fordon, etc tas fram. DUL utgör underlaget för tillståndsansökan om inledande drift.

### **14.3.3 Program**

I ett sexårsperspektiv har de inledande och kompletta platsundersökningarna kommit så långt att projekteringen kan utnyttja data från de aktuella platserna. Projekteringsskede D är genomfört och platsanpassade utformningar av djupförvarets anläggningar framtagna. Utformningen av anläggningarna ovan jord är redovisade. Anläggningsdelar under jord placeras och avgränsas med hänsyn till geologin, speciellt med avseende på avståndet till större deformationszoner.

Förutom den platspecifika projekteringen planerar SKB att under sexårsperioden redovisa de samlade erfarenheterna från Äspölaboratoriet rörande praktisk genomförbarhet av djupförvarstekniken, så att erfarenheterna fullt utnyttjas i den detaljerade projekteringen.



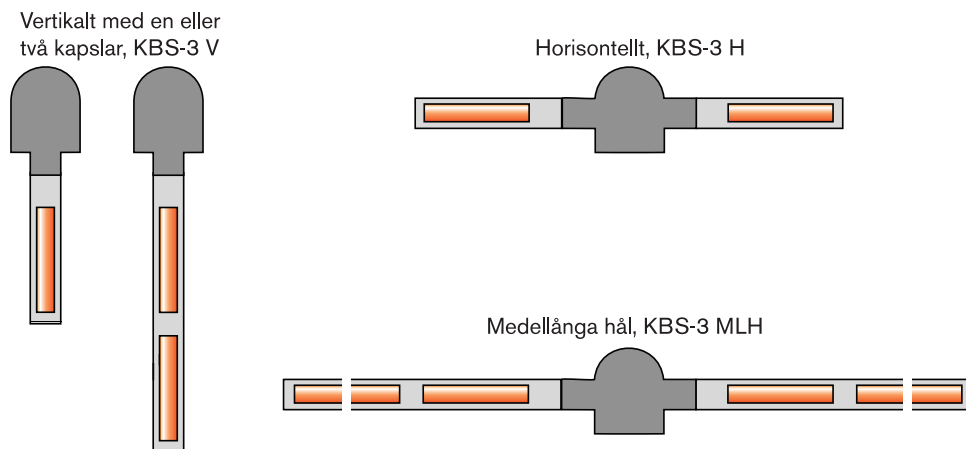
## 14.4 Varianter av KBS-3

SKB har under åren utvecklat och utvärderat alternativ till KBS-3 /14-20, 14-21, 14-22/. Alla dessa tidigare utvärderingar pekar entydigt på att KBS-3-metoden är att föredra. I det nyligen avslutade JADE-projektet (Jämförelse Av DEponeringsmetoder) /14-23/ har några varianter av KBS-3 jämförts, se figur 14-3. De varianter som studerades är:

- Vertikal deponering med en eller flera kapslar i varje deponeringshål (KBS-3 V).
- Horisontell deponering med en kapsel i varje deponeringshål (KBS-3 H).
- Horisontell deponering med flera kapslar efter varandra i medellånga deponeringshål (KBS-3 MLH).

De olika varianterna innebär att ovanjordsanläggningen, den anslutande rampen, schaktet och centralområdet under jord kan utformas likadant oberoende av hur själva deponeringsområdet ser ut.

Resultatet av JADE-studien är att KBS-3 V med en kapsel i varje deponeringshål kvarstår som referensutformning. Två kapslar i varje deponeringshål kan eventuellt ge lägre anläggningskostnader. KBS-3 H avskrivs, eftersom den horisontella deponeringen inte bedöms ha några fördelar jämfört med den vertikala. KBS-3 MLH bedöms däremot preliminärt vara bättre än referensutformningen när det gäller miljöpåverkan och ekonomi.



*Figur 14-3. Olika varianter av KBS-3-metoden.*

## Medellånga hål

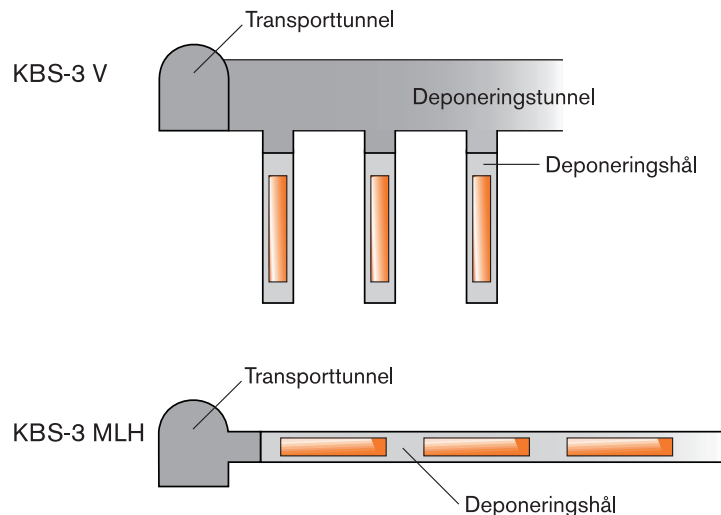
KBS-3 MLH innebär att kapslarna deponeras horisontellt efter varandra i 200–250 meter långa deponeringshål. Kapslarna och de omgivande bentonitblocken är desamma som i ett KBS-3-förvar. Figur 14-4 visar en principskiss av ett KBS-3 V respektive ett KBS-3 MLH-förvar.

Som framgår av principskisserna finns det inga deponeringstunnlar i ett KBS-3 MLH-förvar. Deponeringshålen utgår i stället direkt från transporttunnlarna. Det innebär att den totalt uttagna bergmassan blir mycket mindre än för referensutformningen KBS-3 V. Därmed sänks kostnaderna för att bygga djupförvaret. Även miljöpåverkan blir mindre, eftersom den uttagna bergvolymen är väsentligt mindre. Däremot har ingen signifikant skillnad när det gäller långsiktig säkerhet påvisats /14-24/.

Vinsterna när det gäller främst miljöpåverkan, men även kostnader, gör att ett KBS-3 MLH-förvar är en intressant variant av referensutformningen. Varianten har emellertid inte nått samma tekniska mognadsgrad som KBS-3 V. Stora insatser krävs framför allt för att utveckla deponeringsteknik samt maskiner och annan utrustning.

För att närmare utreda vilka resurser som skulle behövas i form av tid och pengar har SKB påbörjat arbetet med att ta fram ett forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för konceptet medellånga hål. Förutom att klargöra resursbehovet ska programmet kunna fungera som ett underlag för ett eventuellt beslut om fortsatta forsknings- och utvecklingsinsatser.

Under den närmaste sexårsperioden planerar SKB inte att göra några egna insatser när det gäller demonstration. Anledningen är att SKB prioriterar de pågående experimenten i Äspölaboratoriet. Att utöka verksamheten där med att borra horisontella deponeringshål för demonstrationsförsök kan innebära att randvillkoren för de övriga experimenten förändras.



**Figur 14-4.** Principiell skillnad mellan referensmetoden KBS-3 V och ett KBS-3 MLH-förvar.

## ***Två kapslar i varje håll***

SKB planerar att under den kommande FUD-perioden utreda vertikal deponering enligt KBS-3 V med två kapslar i samma deponeringshåll.

## **14.5 Teknik – utveckling och demonstration**

Djupförvaret utformas så att kapslarna kan hanteras och placeras på avsedd plats utan att personalens och omgivningens säkerhet äventyras. Detta gäller såväl strålskydd som övriga frågor som rör yttre och inre miljö.

SKB:s arbete syftar till att säkerställa att de metoder och material samt den teknik som behövs för att bygga, driva och försluta ett djupförvar som motsvarar ställda krav finns tillgängliga. Vid Äspölaboratoriet bedriver SKB experiment för att utreda de förhållanden som råder på tänkt förvarsdjup samt teknikutveckling och demonstration av de moment som ingår i djupförvarsverksamheten, se avsnitten 12.2 och 12.3. I experimenten har vissa förenklingar av hanteringen genomförts, eftersom de kapslar som hanteras inte innehållit använt kärnbränsle och inte avger någon strålning. Förutom att experimenten ger värdefulla erfarenheter är de, som SKI påpekat i sin granskning av FUD-program 98, helt nödvändiga för att SKB ska kunna uppnå trovärdighet och acceptans för djupförvars-konceptet.

SKB har i huvudsak följt det utvecklingsprogram som presenterades i FUD-program 98 när det gäller teknikutveckling och demonstration. De pågående experimenten i Äspölaboratoriet ger ytterligare erfarenhet av borrhning av deponeringshåll, deponering av bentonit och kapslar, återfyllning och förslutning av deponeringstunnlar etc. Detta innebär att det finns erfarenhet av de arbetsmoment som ingår i byggnation, drift och förslutning av djupförvaret. Inför detaljundersökningar och den inledande driften kan behov av anpassningar av teknik och metoder till den valda platsens förutsättningar samt krav från till exempel analyser av drift och långsiktig säkerhet bli aktuella.

### **14.5.1 Byggmetoder**

Byggandet av anläggningar under jord ger mekanisk påverkan på bergmassan. Kring de hålrum som skapas sker spänningsomlagringar och deformationer. Denna påverkan är lokal och styrs av de initiala bergspänningarna, bergmassans egenskaper och hålrummens geometri.

Drivning av tunnlar kan göras genom konventionell borrhning och sprängning eller genom mekanisk brytning, oftast fullortsborrhning med tunnelborrningsmaskin (TBM). Båda metoderna har använts med gott resultat vid drivningen av tunnlar vid Äspölaboratoriet och ett värdefullt underlag för val av brytningsmetodik i djupförvaret har erhållits. Experiment vid Äspölaboratoriet, ZEDEX /14-25/, har visat att tunneldrivning med borrhning och sprängning ger betydligt större påverkan på zonen närmast tunneln än drivning med tunnelborrhning. Möjliga metoder för borrhning av deponeringshålen är: fullborrhning, kärnborrhning respektive hammarborrhning. Vid Äspölaboratoriet har fullborrhning av deponeringshåll i full skala utförts med en ombyggd tunnelborrningsmaskin och med gott resultat. Totalt har 13 deponeringshåll borrats, vilket överensstämmer med den plan som redovisats i FUD-program 98.

Baserat i huvudsak på nu befintligt underlag kan slutligt val av och vidareutveckling av drivningsmetoder, maskiner och utrustning ske. Detta sker parallellt med framtagningen av projekteringsunderlag för detaljundersökning och utbyggnad för den inledande driften, dvs när geologisk information från bl a platsundersökningarna föreligger. Handlingsfriheten vad gäller metoder för drivning av deponeringstunnlar och deponeringshål kvarstår även efter påbörjad deponering.

Mängden grundvatten som läcker in i djupförvaret under byggnation och drift får inte vara för stor. Ett för stort inflöde av grundvatten innebär försämrad arbetsmiljö och försämrad hantering av bl a buffertmaterialet. Genom bergtätning av sprickor och transmissiva zoner kan inläckaget begränsas. Under år 2001 har de i FUD-program 98 beskrivna experimenten avseende olika injekteringsmaterials strömningsegenskaper, tätningsförmåga och beständighet avslutats. De experimentella studierna genomfördes i laboratorium och i verifierande fältförsök vid Äspölaboratoriet. I anslutning till detta arbete kommer en översikt av uppnådda resultat att tas fram. SKB kommer också fortsättningsvis att följa den tekniska utvecklingen på området.

### **14.5.2 Tillverkning av bentonitblock och ringar**

Valet av buffertmaterial och utformningen av bufferten runt kapseln utgår från de grundläggande kraven för dess isolerande respektive fördröjande funktion. Det buffertmaterial som är aktuellt är svällande bentonitlera.

För tillverkning av bentonitblock och ringar finns i huvudsak två metoder att tillgå; enaxlig pressning och isostatisk pressning. Båda metoderna har studerats av SKB och målet är att ta fram metoder och utrustningar som klarar av att i industriell skala framställa de block och ringar som behövs i djupförvaret.

Utvecklingsarbetet visar hittills att både isostatisk och enaxlig pressning kan användas för framställning av bentonitbufferten kring kapslarna. Block med höjden 50 cm och diametern 165 cm för placering under och över kapseln och ringar med samma höjd och ytterdiameter och med en innerdiameter av 107 cm har pressats till både naturlig vattenkvot (10 procent) och förhöjd vattenkvot (17 procent), se avsnitt 6.1.7. Sedan FUD-program 98 har totalt cirka 100 bentonitblock och ringar framställts för experiment i Äspölaboratoriet. Dessa har tillverkats 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. Detta innebär att studier av teknik för framställning av block med större höjd pågår med inriktning mot tillverkning genom isostatisk pressning. Idag finns i Sverige ingen isostatisk press som är tillräckligt stor för att pressa block med full diameter (165 cm). SKB planerar att genomföra isostatisk pressning av block och ringar med diametern cirka 100 cm med befintlig utrustning.

Hittills har tillverkning och prov genomförts med bentonit med hög smektithalt (MX-80). SKB avser att fortsätta, den redan i FUD-program 98 omnämnda, utvärderingen av vilken betydelse bentonitkvalitet och förbehandlingsmetoder har för blockens kvalitet och funktion.

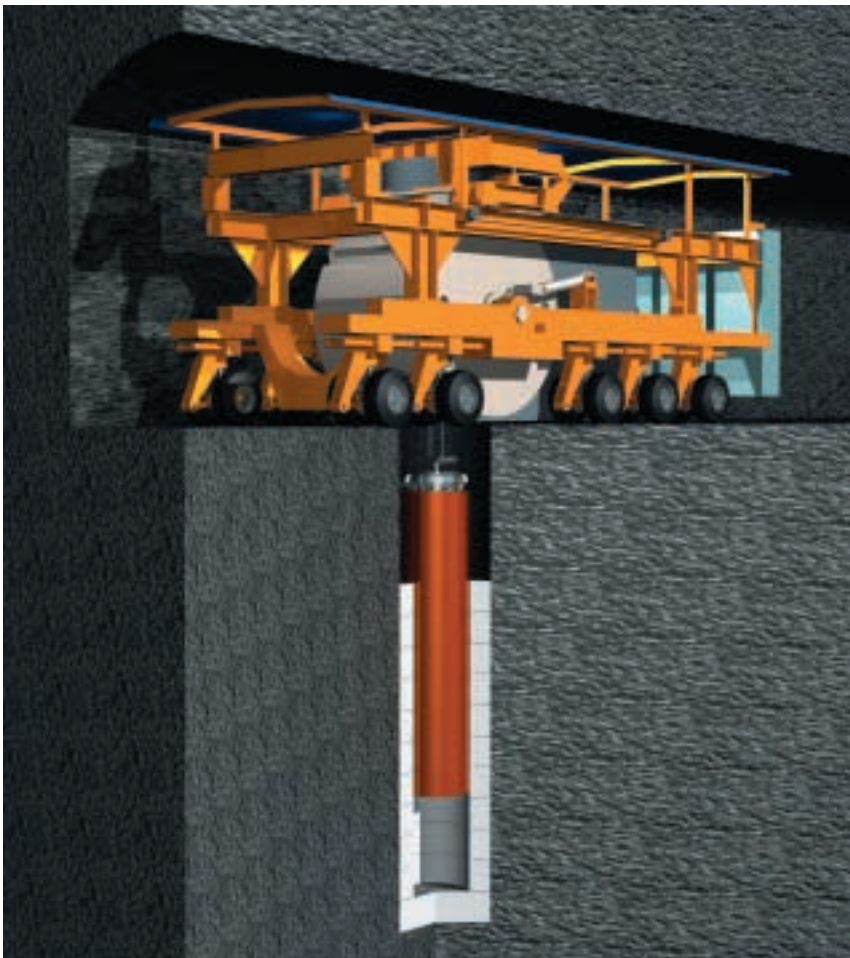
### 14.5.3 Inplacering av bentonit och deponering av kapslar

Enligt SKB:s referensutformning deponeras kapslarna en och en i vertikala deponeringshål i deponeringstunnlarna.

SKB har tillverkat en prototyp av en deponeringsmaskin i full skala för att kunna prova och demonstrera tekniken för deponering av kapslar i djupförvaret. Prototypen levererades till Äspö 1999. Syftet är att skaffa erfarenheter från konstruktion, tillverkning och drift av en sådan maskin. Deponeringsmaskinen är specialbyggd för att kunna fungera i trånga utrymmen eftersom detta är av stor vikt i djupförvaret, se figur 14-5. Det är också nödvändig att maskinen med en rimlig arbetsinsats ska kunna flyttas mellan deponeringstunnlarna.

Arrangemangen i Äspö är begränsade till enbart deponeringsmaskinen. De kringfunktioner som kommer att krävas med transport av transportbehållare från inkapslingsanläggningen ned till förvarsnivån och överföring av kapseln från transportbehållare till deponeringsmaskinens strålskyddstub har hittills endast studerats översiktligt.

Bentoniten i form av block och ringar placeras i deponeringshålet. När bentoniten är på plats körs kapseln fram till deponeringshålet med deponeringsmaskinen och sänks ner i det inre utrymmet i bentoniten. När kapseln har sänkts ner läggs bentonitblock över kapseln och resterande del av hålet fylls upp med återfyllnad. All hantering sker i en strålskärmad miljö och personal kan övervaka deponeringen.



*Figur 14-5. SKB har låtit tillverka en prototyp till en deponeringsmaskin.*

Bottenavjämningen i deponeringshålet är känslig, eftersom en lutning gör att stapeln av bentonitblock lutar.

Enligt vad som planerades i FUD-program 98 har SKB demonstrerat de olika stegen vid deponering av kapslar. Detta har skett i Äspölaboratoriet i projektet Återtag, där en kapsel har deponerats i ett fullstort deponeringshål. I ett fullskaleförsök vid Äspölaboratoriet av KBS-3-metoden i sin helhet, Prototypförvar, kommer ytterligare kapslar att deponeras under perioden 2001–2002 i fyra fullstora deponeringshål i en inre sektion och två i en yttre sektion. Prototypförvaret ska i största möjliga utsträckning simulera ett KBS-3-förvar under vad som kan beskrivas som normala förhållanden med avseende på geometri, material och bergförhållanden. Prototypförvaret skiljer sig från ett verkligt förvar i det att värmeeffekten kommer att genereras av elektriska värmare istället för använt kärnbränsle. Vid Äspölaboratoriet har dränering av deponeringshålen från inrinnande vatten lösts genom pumpning. Efter installation av bentonitblocken behöver en kontrollerad luftfuktighet hållas i spalten mellan block och berg för att bentoniten inte ska ta upp vatten och svälla respektive avge vatten och krympa.

Verksamheten under perioden 2002–2007 är i huvudsak inriktad på att ta fram program för fortsatt utveckling av specialmaskiner för tunga transporter och deponering av buffert och kapslar.

SKB planerar också att studera hur erforderlig densitet kan uppnås med hänsyn till dimensionerna på deponeringshål respektive bentonitblock (toleranser), deponeringsverktyg, fukthalt i bentonitblock och luft, presstryck vid blocktillverkning etc. Olika möjligheter att öka bentonitbuffertens densitet är att minska spalten mellan buffert och berg eller att fylla den med bentonitpellets.

#### **14.5.4 Återfyllning**

Det material som används som återfyllning ska bidra till att tunnarna förblir stabila och hålla bentoniten kring kapslarna på plats. Återfyllningen ska också begränsa vattenflödet. Återfyllningen ska inte medföra att grundvattnets kvalitet försämras samt vara kemiskt stabil under lång tid.

Olika material och teknik för återfyllning av tunnlar, berggrum och schakt i ett djupförvar har övervägts i SKB:s utvecklingsarbete genom åren. Exempel på material är bentonit och krossat berg, bentonit och kvartssand eller enbart krossat berg.

Vid Äspölaboratoriet utvecklar och provar SKB packningsteknik och material för återfyllning i full skala i Backfill and Plug Test och Prototypförvaret. I experimentet Backfill and Plug Test, som färdigställts enligt den plan som angavs i FUD-program 98, har en sprängd tunnel återfyllts. Den inre delen av tunneln har återfyllts med en blandning av bentonit och krossat berg och den yttre delen med enbart krossat berg. Återfyllningen har packats in lagervis och komprimerats på plats med vibratorplattor som utvecklats och byggts speciellt för detta ändamål. Lagren packades med en lutning av 35 grader mot horisontalplanet, vilket visat sig optimalt. I den del av tunneln som återfyllts med enbart krossat berg har utrymmet mellan återfyllningen och tunneltaket fyllts med block av kompakterad bentonit. Detta har gjorts för att erhålla god kontakt mellan återfyllningen och berget eftersom krossat berg inte har någon svällförmåga.

Under experimentet görs bl a mätningar av återfyllningens och betongpluggens tätningförmåga, se avsnitt 7.2.2. När mätningarna är genomförda kommer återfyllnadsmaterialet att grävas ut och den utgrävda återfyllningen kommer att undersökas och analyseras.

Under 2001–2002 kommer ytterligare en tunnel att återfyllas, i Prototypförvaret, med en blandning av bentonit och krossat berg. Inläckande vatten i deponeringstunnlar försvårar den praktiska genomförbarheten och SKB avser att pröva olika tekniska lösningar beroende på till exempel varierande mängd inläckande vatten till en deponeringstunnel.

### 14.5.5 Förslutning

Efter det att en deponeringstunnel är återfylld behöver man försluta tunnelns ändar i avvaktan på att hela djupförvaret försluts. Driftförslutning dimensioneras så att snabba vattentransporter i återfyllnaden som skapar materialförflyttning undviks. Förslutningen ska också vara tillräckligt kraftig att motstå svälltryck från återfyllnaden och fullt utvecklat vattentryck mot konstruktionen. Driftförslutningar tillräknas ingen funktion vad avser den långsiktiga säkerheten.

Tunnelförslutningar i form av pluggar av den typ som planeras för att tillfälligt försluta deponeringstunnlar ingår i fullskaleexperimenten Backfill and Plug Test och Prototypförvar i Äspölaboratoriet. Den sprängda försökstunneln i Backfill and Plug Test förslöts med en betongplugg 1999. Pluggen är fastgjuten i en 1,5 meter djup triangulär nisch i berget i pluggens periferi för att hålla emot vattentrycket och svälltrycket från återfyllningen samt skära av den störda zonen.

SKB:s bedömning är att tillräckliga kunskaper finns beträffande utformning och konstruktion av driftförslutningar.

När det gäller den slutliga förslutningen av djupförvaret planerar SKB att under den närmaste treårsperioden närmare klarlägga förslutningens funktion. Därefter kommer tekniska lösningar att utarbetas. SKB är klar över att pluggars placering i djupförvaret till övervägande delar är styrd av platsspecifika förhållanden och detta är en av de projekteringsfrågor som behandlas i ansökan om djupförvaret.

### 14.5.6 Återtag

Under den inledande driften av djupförvaret deponeras 200–400 kapslar i ett första steg. Parallellt sker en utvärdering av hantering och praktiska aspekter. Den långsiktiga säkerheten beaktas indirekt genom att ställda krav på deponeringsprocessen kontrolleras.

Om man vid denna utvärdering eller vid senare tillfällen finner det nödvändigt att återta deponerade kapslar med använt kärnbränslet från djupförvaret, måste teknik och metoder för detta samt anläggning för mellanlagring av bränslet finnas tillgängliga. Dessa aspekter framförs av SKI i granskningen av FUD-program 98 /14-11/.

Inga åtgärder vidtas i hanteringen av bränslet och inga arrangemang byggs in i djupförvaret, som onödigtvis försvårar ett återtag. På samma sätt ska möjligheten till återtag inte främjas på bekostnad av djupförvarets förmåga att uppfylla kraven på säkerhet och strålskydd. I Sverige finns inget formellt krav på att återtag ska vara möjligt. För att ett återtag ska kunna genomföras krävs tillstånd, så detta är ingenting som SKB själva kan besluta om.

Hanteringen vid återtag av deponerade kapslar beror av när i tiden återtaget genomförs. Återtag direkt efter deponeringen, innan bentonitblocken svällt, är relativt enkelt. Processen blir mer omfattande om buffertmaterialet börjat svälla. Då måste kapseln friläggas, dvs buffertmaterialet tas bort, innan den kan lyftas ur deponeringshålet.

Har hela deponeringstunneln återfyllts och förslutits ökar arbetsinsatsen för att kunna genomföra ett återtag. Har hela djupförvaret förslutits efter avslutad deponering, ökar arbetsinsats och kostnader väsentligt.

Sedan kapslarna återtagits från djupförvaret förs de till någon typ av mellanlager. Om systemet för hantering av använt kärnbränsle fortfarande är i drift vid detta tillfälle, är det rimligt att ett sådant mellanlager förläggs i anslutning till CLAB och inkapslingsanläggningen. I annat fall måste en anläggning för kärnteknisk verksamhet upprättas på lämplig plats.

Under de senaste åren har ett antal metoder för att avlägsna bentonit studerats /14-26/. De metoder som studerats kan indelas i fyra huvudkategorier: mekaniska, hydrodynamiska, termiska och elektrotekniska metoder. Av dessa har den hydrodynamiska metoden uppvisat de bästa resultaten. Den innebär att salthaltigt vatten (4–6 procent) upprepade gånger spolas över bentoniten. Detta leder till att bentoniten bildar en suspension och kan pumpas bort från hålet. Bentonitlammet kan sedan avvattnas i en filterpress eller i en centrifug.

Den hydrodynamiska metoden kommer att demonstreras vid Äspölaboratoriet i det pågående experimentet ”Återtag” där SKB under realistiska förhållanden utvecklar och provar tekniken för att återta en kapsel från vattenmättad och uppsvälld bentonitbuffert.

#### **14.5.7 Konstruktions- och strömaterial**

Under byggnation och drift av djupförvaret förs konstruktions- och strömaterial ner i djupförvaret. Exempel på konstruktionsmaterial är cement, betong och stål som används i bergtätning, bergförstärkning och golv. Innan kapslarna deponeras förs de konstruktioner som inte är nödvändiga från stabilitets- eller säkerhetssynpunkt bort. Förutom konstruktionsmaterial kommer strömaterial i form av spill och restprodukter från maskin-användning, föroreningar från sprängning, mänskligt avfall och material som introduceras via ventilationsluften att finnas i djupförvaret.

Mängden material som blir kvar i djupförvaret efter byggnation och drift har uppskattats /14-27/. Baserat på denna utredning och information om den kemiska sammansättningen hos materialen har mängden av specifika kemiska ämnen som tillförs djupförvaret uppskattats /14-28/ och jämförts med de mängder som tillförs via djupförvarets naturliga material, det vill säga kapselmaterial, bentonitbuffert, återfyllning och inströmmande grundvatten. Mängden kemiska ämnen som tillförs via konstruktions- och strömaterialen är relativt liten i jämförelse med förekomsten i djupförvarets naturliga material. Ett undantag är förekomsten av kalcium om cement används för bottenavjämning i deponeringshål. De processer som har betydelse för djupförvarets långsiktiga funktion och säkerhet och som kan komma att påverkas av förekomsten av de tillförda kemiska ämnena har identifierats /14-28/.

SKB och Posiva har ett samarbete som syftar till att utreda och prova om lågalkaliska cementbaserade material kan användas som konstruktionsbetong, sprutbetong och för injektering. Denna cement har fördelen att ge pH-värden under 11.

SKB deltar också i ett EU-projekt (ECOCLAY II) som syftar till att öka förståelsen för hur förekomst av bl a cement påverkar bentonit.

Under kommande period gör SKB en kritisk genomgång av de konstruktions- och strömaterial som kan tänkas förekomma i ett förvar samt belysa dess betydelse för den långsiktiga säkerheten, se avsnitt 7.2.16.



### 14.5.8 Tätning av undersökningsborrhål

Vid plats- och detaljundersökningar borrar ett antal undersökningsborrhål för att erhålla data om bergets egenskaper. Dessa borrhål måste tätas, senast i samband med förslutning av djupförvaret, så att de inte utgör flödesvägar från förvarsdjup till biosfären. Tätning sker genom att hålen fylls med bentonit eller cement. Då de flesta borrhålen instrumenteras i samband med undersökningarna, behövs även tillgång till pålitlig teknik för att rensa borrhål så att de senare kan tätas.

Teknik för tätning av borrhål har tidigare utvecklats och provats inom ramen för Stripa-projektet /14-29/. Två olika tekniker användes för att föra in högkompakterade bentonitblock i borrhål med en längd av upp till 200 meter. Mycket god tätning erhöles. En vidareutveckling av tekniken erfordras för att visa att borrhål med längder upp till 1 000 meter kan tätas. En annan tätningsteknik har provats av Nagra och går ut på att blåsa in bentonitpellets med slang. Denna teknik har också utvärderats för eventuella prov under svenska förhållanden.

Under den kommande sexårsperioden planeras fältförsök vid Äspölaboratoriet. Dessa försök omfattar vidareutveckling av befintlig teknik för kortare borrhål (några hundra meter) samt framtagning av teknik för djupa borrhål (upp till cirka 1 000 meter). Arbetet inleds med en analys av vilka täthetskrav som bör ställas. Därefter görs en genomgång av tillgängliga tekniker och deras potential för att uppfylla kraven. Den eller de mest lovande teknikerna väljs för fortsatt utveckling och prov.

Planen är att påbörja arbetet under 2002 och avsluta det under en treårsperiod. På Äspö finns sedan tidigare ett stort antal undersökningsborrhål. I några av dessa hål har utrustning fastnat och hålen fyller inte längre någon funktion. Ett eller ett par av dessa hål kommer att användas i utvecklingsarbetet.

### 14.5.9 Utvecklingsprogram

I ovanstående text har de planerade insatserna vad gäller teknikutveckling och demonstration redovisats. Dessa redovisningar sammanställs nedan.

Programmet för teknikutveckling och demonstration omfattar byggnation, drift och förslutning av djupförvaret. Syftet är att underbygga val av utrustning, material och arbetsmetoder vid djupförvaret. Pågående och planerade demonstrationsprojekt vid Äspölaboratoriet liksom platsspecifik information från de planerade platsundersökningarna kommer att ge nya och värdefulla erfarenheter och insikter som kommer att kunna inarbetas i utformningen av anläggningen.

De aktiviteter som huvudsakligen planeras är att:

- Sammanställa praktiska erfarenheter från Äspölaboratoriet vad avser genomförbarhet av deponering m m och den praktiska driften av anläggningen.
- Vidareutveckla metoder, maskiner och utrustning för tillredning av tunnlar, schakt, ramper och deponeringshål efter de behov som framkommer vid projektering av anläggningen.
- Vidareutveckla utrustning för tillverkning av bentonitblock med nära full storlek med isostatisk pressning.
- Ta fram ett program för fortsatt utveckling av specialmaskiner för tunga transporter, deponering av buffert och kapslar samt inplacering av återfyllning.

- Klarlägga förslutningens funktion i djupförvaret under kommande treårsperiod och därefter vid behov ta fram tekniska lösningar för dessa.
- Demonstrera hur en kapsel kan återtas från en vattenmättad bentonitbuffert.
- I samarbete med Posiva utreda och prova om lågalkaliska cementbaserade material (pH<11) kan användas som konstruktionsbetong, sprutbetong och för injektering.
- Vidareutveckla metoder och teknik för att rensa och försluta undersökningsborrhål.

## 14.6 Transporter

Hantering och transport av kärnavfall och använt kärnbränsle är känd och beprövad teknik. Praktiska erfarenheter finns sedan flera decennier i såväl Sverige som i andra länder. Transporter av radioaktivt avfall inklusive inkapslat använt kärnbränsle sker inom ramen för nationella och internationella lagar och bestämmelser. Sådana bestämmelser har utfärdats av FN:s internationella atomenergiorgan, IAEA och av de svenska myndigheterna SSI och SKI.

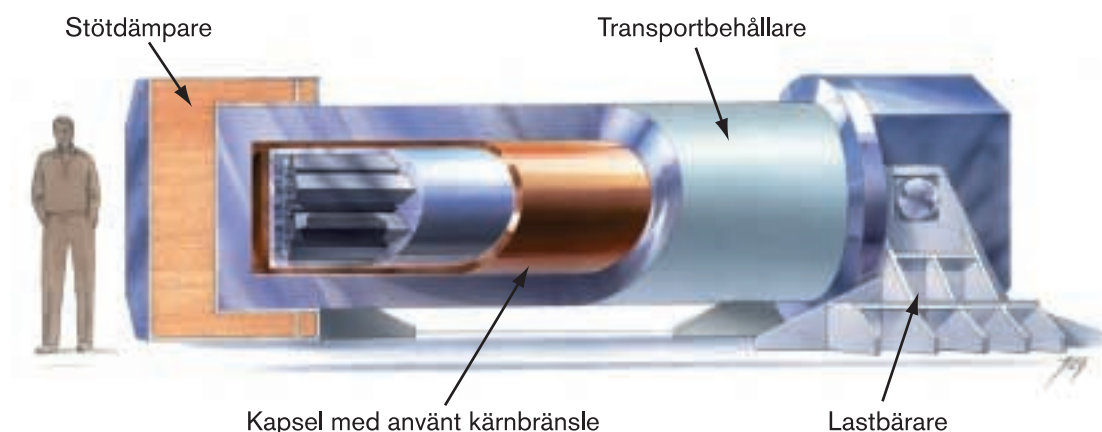
Under anläggningsskedet transporteras bergmassor, schaktmassor, byggmaterial, maskiner, förnödenheter och personal. Under driftskedet tillkommer i huvudsak två typer av transporter av gods: tunga enheter med inkapslat använt kärnbränsle från inkapslingsanläggningen till djupförvaret och massgod i form av bentonitlera och eventuell sand till återfyllnaden. Till detta kommer transporter av personal och gods som krävs för driften av anläggningen.

Transportsystemet behöver inför etableringen av djupförvaret utökas för att också transportera inkapslat använt kärnbränsle från inkapslingsanläggningen till djupförvaret. Inkapslat använt kärnbränsle är bättre skyddat än det bränsle som idag transporteras eftersom bränselelementen då är inneslutna i helt täta kapslar. En kapsel med bränselelement väger cirka 25 ton och transporteras i speciella transportbehållare.

Transportbehållarna, se figur 14-6, som skyddar kapslarna från att de lämnar inkapslingsanläggningen tills att de transporterats ner till en omlastningshall i djupförvarets centralområde under jord, konstrueras i enlighet med de krav som ställs upp av IAEA. Behållarna skärmar strålningen från bränslet så att de kan hanteras utan ytterligare strålskärming under transporten. Behållarna skyddar också kapseln mot skador. De uppfyller krav på hållfasthet och värmetålighet samt har förmågan att avleda den avgivna resteffekten så att varken kapsel eller behållare får för hög temperatur. Behållarnas hållfasthet ska klara de påfrestningar som kan bli aktuella vid tänkbara olyckor. Kraven på mekaniskt skydd medför att transportbehållarna blir tunga. En transportbehållare med kapsel i, se figur 14-6, väger cirka 65 ton utan och 75 ton med lastbärare. SKB har i ett samarbete med Tyskland genomfört en förstudie av transportbehållare för kapslar.

Transportbehållarna kan transporteras sjövägen, på landsväg eller med järnväg beroende på de lokala förhållandena på platsen. Lokaliseringen av djupförvaret har således betydelse för valet av transportsätt.

I både Forsmark i Östhammars kommun och Simpevarp i Oskarhamns kommun kan djupförvarets ovanjordsanläggning förläggas till ett industriområde med kärnteknisk verksamhet /14-3, 14-5/. Anslutning till djupförvarets underjordsdel görs med en tunnel. Det finns en hamn som kan användas och inga landtransporter behöver ske utanför industriområdet. I Simpevarp kan det bli aktuellt att förlägga djupförvarets underjordsdel



*Figur 14-6. Transportbehållare för kapslar.*

skilt från kärnkraftverkets industriområde. I detta fall kan det vara lämpligt att etablera ett driftområde ovanför underjordsanläggningens centralområde, vilket innebär att ett system för landtransport mellan hamnen och driftområdet etableras.

Det aktuella geologiska området i Tierps kommun är stort. Närheten till Ostkustbanan och E4 ger goda anslutningsmöjligheter för väg och järnväg. Troligen behövs en ny-etablering av järnvägsanslutning eftersom transport av inkapslat bränsle krävs från någon hamn, i första hand Skutskär till driftområdet /14-6/.

Transporterna mellan inkapslingsanläggningen och djupförvaret sker med känd och beprövad teknik. Valet av transportsätt, utformningen av transportsystemet, liksom val av utrustning är en praktisk fråga som kopplar till de lokala förhållandena på platsen. De varianter som föreligger är till exempel beroende på om transportbehållarna ska anpassas till enbart transport med terminalfordon eller kombination av både terminalfordon och sjövägs-, järnvägs- eller landsvägstransport. Lokala transporter vid djupförvaret kan också medföra konstruktionsstyrande krav och förutsättningar för transportsystemet. Rutter och beskrivning för transporter lämnas först när djupförvarets lokalisering är klar.

Placeras inkapslingsanläggningen inte, som i huvudalternativet, invid inkapslingsanläggningen är transport av använt kärnbränsle mellan CLAB och inkapslingsanläggningen aktuellt. Transport av använt kärnbränsle sker idag sjövägen mellan kärnkraftverken och CLAB, så för sådana transporter finns ett utbyggt transportsystem. För inkapslingsanläggningen ett inlandsläge måste använt kärnbränsle transporteras på järnväg eller väg. Lokaliseras inkapslingsanläggningen inte till CLAB kommer troligen dagens transportbehållare för transport av använt kärnbränsle att bytas ut till en ny typ med större lastkapacitet eftersom det använda bränslet då har betydligt lägre aktivitet. Sådana behållare finns utvecklade och används i andra länder.

Det system för bevakning, kommunikation och olycksberedskap som tillämpas vid dagens transporter av använt kärnbränsle är en mall för transporter av inkapslat bränsle. Det uppfyller dels kraven på fysiskt skydd, dels SKB:s och driftorganisationernas behov av kommunikation och uppföljning under pågående transporter. Systemet består av en kombination av tekniska och administrativa åtgärder som dels fysiskt skyddar godset, dels möjliggör snabb upptäckt och larm om onormala förhållanden uppstår.

Även för det fallet att en kapsel skadats vid transport eller att kapsel underkänns vid besiktning inför deponering tas rutiner fram för transport av den defekta kapseln till inkapslingsanläggningen där det alltid ska vara möjligt att ta in en returnerad kapsel för kontroll och åtgärd oavsett orsak till returnen.

I samband med förstudierna har transportfrågorna nyligen aktualiserats och utretts. Den utveckling som bedrivs inom de närmsta åren vad gäller transporter är relaterad till att anpassa transportsystemet till de platser som är aktuella för platsundersökningar. Översiktliga studier av transportsystemet tas fram inom ramen för de arbeten som genomförs i samband med platsundersökningarna vid de tre platserna. I samband med detta arbete kommer alternativ och varianter av transportsystemet att studeras.

Transportsystemet och transportbehovet redovisas i den miljökonsekvensbeskrivning som tas fram inför ansökan om detaljundersökning av aktuell plats.

## 14.7 Safeguard och fysiskt skydd

Sverige har genom internationella överenskommelser, till exempel ickespridningsavtalet /14-30/, Euratomfördraget och flera bilaterala avtal, förbundit sig att använda kärnämne enbart för fredligt bruk, samt åtagit sig att redovisa all hantering av kärnämnen bl a det använda kärnbränslet. Sverige har också accepterat att allt material av denna typ står under internationell kontroll. Denna s k safeguardkontroll administreras av Euratom och IAEA. 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 djupförvar /14-31/ där det bl a rekommenderas att safeguardkontroll ska upprätthållas även sedan djupförvaret har återfyllts och förslutits. Inom IAEA har man konstaterat att ett förslutet djupförvar behöver stå under safeguardkontroll, så länge motsvarande kontroll sker på andra områden.

Arbete pågår internationellt för att definiera kraven på safeguardsystemet för ett förslutet djupförvar. I vissa avseenden kan det finnas behov av att utveckla ny teknik. 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 safeguardsystemet som garanterar en kontinuerlig kunskap om förhållandena i djupförvaret.

För att få ett väl fungerande safeguardsystem är det viktigt att ha en helhetssyn för hela bränslehanteringskedjan varför inkapsling 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 15 där safeguardsystemet för inkapslingsanläggningen presenteras. Under transporter och drift av djupförvaret krävs därför en god kontroll av flödet av klyvbart material till och från djupförvaret. Detta ställer krav på kontrollfunktionen.

I systemet utgör kapseln en redovisningsenhet. Varje kapsel har en unik beteckning som noteras och dess innehåll dokumenteras. Förflyttningen av kapslar dokumenteras i safeguardredovisningen. Kapselns unika beteckning kontrolleras och dokumenteras när kapseln lyfts upp ur transportbehållaren i djupförvaret och deponeras. Kontroll av att kapslar inte transporteras upp ur djupförvaret arrangeras.

En viktig komponent i systemet för safeguardkontroll 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 inspektioner behöver genomföras vid regelbundna tillfällen under djupförvarets anläggning och drift.

Ett eventuellt återtag av deponerade kapslar efter det första demonstrationssteget eller vid ett annat tillfälle ställer också krav på safeguardsystemet. Det gäller att otvetydigt kunna fastställa identiteten på de kapslar som tas upp. I övrigt bör samma principer kunna tillämpas vid återtag, transport och mellanlagring som gäller för de olika momenten vid deponering av kapslarna.

SKB kommer under perioden 2002–2007 att följa den internationella teknikutvecklingen på området men planerar inte att bedriva någon egen utveckling eller demonstration.

Fysiskt skydd omfattar den bevakning och andra åtgärder som vidtas för att skydda bränslet från stöld eller yttre åverkan. För hantering och transporter finns ett fungerande system för fysiskt skydd. Vid djupförvaret kommer driftområdet att vara inhägnat med staket. Tillträde till området kommer att vara reglerat och kontrollerat på motsvarande sätt som vid de kärntekniska anläggningar som drivs idag. I ett förslutet djupförvar behövs inget fysiskt skydd.



## 15 Inkapsling

Det finns flera olika metoder med vilka det går att tillverka både kopparrör, insatser, lock och bottenar. Det slutliga valet av tillverkningsmetoder bör göras så sent som möjligt för att upprätthålla flexibiliteten och ta tillvara teknisk utveckling. Valet behöver som tidigast göras i samband med projekteringen av kapselfabriken, vilken är planerad att påbörjas år 2007.

Förslutningsteknik och metoder för oförstörande provning utvecklas i första hand på SKB:s Kapsellaboratorium i Oskarshamn. Försöken bedrivs i fullskala och efter inledande problem med utrustning och metoder tog utvecklingen fart under år 2000. Mycket arbete återstår, men resultaten hittills ser lovande ut. Den svetsmetod som idag används på Kapsellaboratoriet är elektronstrålesvetsning men alternativa svetsmetoder studeras också.

En metod som är under utveckling och som det även under några år gjorts praktiska försök med goda resultat ifrån, är friction stir welding. Tekniken är planerad att överföras till Kapsellaboratoriet för att där fortsätta utvecklingen i fullskala under år 2003. Val av metoder för förslutning och provning påverkar utformningen av inkapslingsanläggningen och bör alltså ha gjorts vid tiden för ansökan om tillstånd att få uppföra anläggningen, vilket är planerat till år 2005. 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.

Inkapslingsanläggningens utformning har i stort inte förändrats ifrån vad som redovisades i FUD-program 98. Huvudalternativet är att anläggningen lokaliseras vid CLAB. En alternativ lokalisering vid djupförvaret har studerats och alternativen har jämförts. Fördelarna med en placering vid CLAB överväger. Arbetet med projektering av anläggningen kommer att återupptas under år 2001.

I referensutformningen av kapseln är koppertjockleken 50 mm. Resultat från hittills utförda studier /15-1/ visar att 30 mm koppertjocklek är fullt tillräckligt med avseende på krav på beständighet och hanteringsbarhet. Tillverkningsprov av kopparrör och insats för kapslar med 30 mm koppertjocklek har utförts och en utökning av programmet är planerat. Också inom områdena förslutningsteknik och oförstörande provning är försök planerade att utföras på kapslar med 30 mm koppertjocklek. Även om de tekniker som SKB utvecklar för svetsning i tjock koppar, elektronstrålesvetsning och friction stir welding fungerar för 50 mm koppar kommer tillförlitligheten och kvaliteten på svetsen troligen att bli ännu högre med tunnare gods.

## 15.1 Kapselutformning

De grundläggande konstruktionsförutsättningarna för kapseln har ingående redovisats och kommenterats i FUD-program 98, i SR 97 och /15-1,15-2/. I referensutformningen består kapseln av en tryckbärande insats av segjärn med stållock, se figur 15-1. Insatsen omges av en yttre korrosionsbarriär av koppar. I referenskapseln är kopparhöljets tjocklek satt till 50 mm. I FUD-program 98 och i /15-1/ redovisar SKB ståndpunkten att en sammanvägning av kraven på korrosionsbeständighet och övriga konstruktionsförutsättningar innebär att 30 mm tjocklek på kopparhöljet är tillräckligt. I /15-3/ har en sammanfattande utvärdering av kunskapen om korrosion av koppar i djupförvarsförhållanden gjorts. Utprovningen av tillverkningsmetoder och optimeringen av kapselns detaljutformning inriktas på 50 mm koppertjocklek. Kapslar med 30 mm vägg tjocklek kommer också att tillverkas på prov i syfte att vinna erfarenhet och att utvärdera tillverknings- och kontrollmetoder för sådana kapslar. Denna kunskap kommer att utgöra ett underlag för ett eventuellt senare beslut om ändrad vägg tjocklek.

SKI instämde efter FUD-program 98 med SKB om att det finns både för- och nackdelar med en mindre vägg tjocklek på kopparkapseln när det gäller tillverkning, förslutning och kontrollmetoder. Tillverkning av kopparplåtar (för valsning), förslutning och kontrollmetoder förenklas troligen med tunnare gods. Tillverkning genom extrudering eller dornpressning kan däremot bli svårare vid minskningar av godstjockleken, liksom att det gör kapseln mer känslig vid t ex bearbetning och transporter. Den tjockare insats, som behövs av strålningsskäl vid en mer tunnväggig kopparkapsel, har med stor sannolikhet en positiv effekt på konstruktionens bärförmåga. En förutsättning för att kunna minska koppertjockleken är givetvis att SKB kan visa, genom erhållna resultat vid tillverkning och genom konsekvensanalyser i säkerhetsanalysen, att kapseln uppfyller konstruktionskraven.



Figur 15-1. Mått och viktangivelser för kapsel med 50 mm och 30 mm vägg tjocklek.



## 15.2 Kapseltillverkning

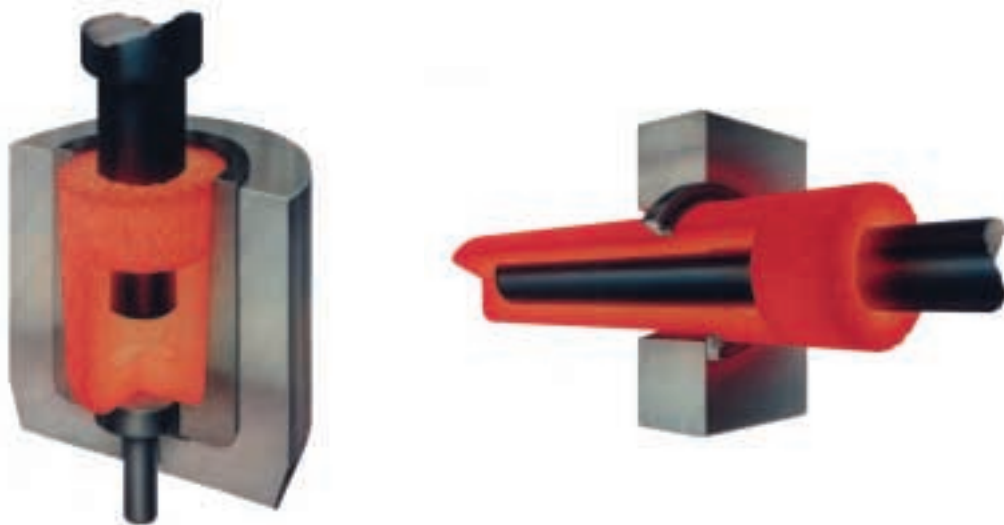
Under de senaste åren har fortsatta tillverkningsprov med kopparkapslar och gjutna insatser utförts i full skala enligt det program som beskrevs i FUD-program 98. I /15-4/ redovisades erhållna resultat fram till augusti 1998 och i en ny rapport /15-5/ redovisas resultaten från den fortsatta provtillverkningen fram till april månad 2001.

All tillverkning av kopparrör i full skala har skett med någon av de tre metoderna, rullformning av valsade kopparplåtar till rörhalvor som svetsas samman med elektronstrålesvetsning, extrudering eller dornpressning. Principen för dornpressning visas i figur 15-2. Tillverkning av rör med rullformning innebär alltså att det färdiga röret innehåller två långsgående svetsar vilket kan betraktas som en nackdel. Rör som är tillverkade på detta sätt måste också avspänningsglödgas för att säkerställa formstabiliteten.

SKI var i sin bedömning av FUD-program 98 kritisk till tillverkning av kopparrör genom rullformning och långssvetsning. SKI ifrågasätter metoden både vad gäller erhållen kornstorlek i de valsade kopparplåtarna och kvaliteten hos de långsgående svetsfogarna. SKB måste genom ytterligare provtillverkning visa att mycket bättre och jämnare material kan erhållas med rullformningsmetoden, om denna ska kunna användas för tillverkning av kopparkapslar. SKI var däremot positiv till uppnådda resultat beträffande provtillverkning av sömlösa rör med extrusion och dornpressning och att SKB bör fortsätta arbetet att utveckla dessa metoder.

SKB har framfört till SKI att man instämmer i detta och utvecklingsarbetet avseende rörtillverkning har sedan 1998 koncentrerats på tillverkning av sömlösa rör.

Extrudering och dornpressning är två olika metoder för tillverkning av heldragna eller sömlösa rör. Alla rör som tillverkats efter 1998 har gjorts med någon av dessa två metoder. Båda metoderna förefaller i dagens läge att vara fullt tillämpbara för SKB:s kapseltillverkning. Rör som uppfyller ställda krav har tillverkats både med 50 och 30 mm vägg tjocklek. I synnerhet har resultatet beträffande erhållen kornstorlek varit tillfredsställande. Sammanlagt har 14 sömlösa rör tillverkats, elva med extrudering och tre med dornpressning.



*Figur 15-2. Principen för dornpressning. Till vänster visas det första steget där gjötet förformas till ett ämne med centrumbål och bibehållen botten. Den högra bilden visar steg två där det färdiga röret framställs genom upprepade dragningar genom ett verktyg.*

När det gäller frågan om fortsatt utveckling av tillverkningstekniken för rullformade och längssvetsade rör konstaterar SKB ändå att metoden sannolikt kan utvecklas till ett tillämpbart alternativ för rörtillverkning. Sammanlagt har tolv stycken kopparrör i full storlek längssvetsats. Elva av dessa var tillverkade av 60 eller 65 mm tjocka plåtar avsedda för 50 mm väggjocklek i färdigbearbetade rör. Svetsningen av alla rören utfördes i TWI:s (ett brittiskt institut för svetsforskning) högvakuumkammare. Antalet utförda svetsningar har dock varit långt ifrån tillräckligt för att metoden ska anses färdigutprovad. Med oförstörande provning har förekomst av såväl porositeter som ytliga defekter i svetsfogen kunnat fastställas. Samtidigt kan man dock konstatera att svetsmekniken efter hand kunnat förbättras avsevärt och att resultatet av de senaste svetsarna har bedömts som klart bättre än de tidigare. TWI gör också den bedömningen att svetsning vid reducerat tryck i stället för högvakuum, som är den avsedda utvecklade tekniken för svetsning av kopparkapslar, kommer att underlätta att uppnå en bättre kvalitet hos svetsarna.

Man kan också konstatera att längssvetsning av ett enstaka rör med tunnare väggjocklek (40 mm, avsett för 30 mm färdigmått) varit enklare och gett ett bättre resultat än de mer tjockväggiga rören. En eventuell framtida inriktning på 30 mm väggjocklek i färdiga kapslar kan vara gynnsam för tillämpningen av rullformning och längssvetsning vid rörtillverkning. Den aktuella utvecklingen av friction stir welding kan också innebära tillgång till en alternativ svetsmetod för längssvetsning av kopparrör.

Ett antal lock och bottenar i koppar har tillverkats sedan 1998 /15-5/. De tillverkas genom varmsmide av stränggjutet utgångsmaterial i runddimension och efterföljande maskinbearbetning till ett ämne som är så måttsett att det kan färdigbearbetas till ett lock eller alternativt till en botten. Tillverkningsproven har visat att ett homogent och defektfritt material erhålles i de färdiga komponenterna. Strukturen är grovkornigare än materialet i extruderade eller dornpressade kopparrör men uppfyller kravet på kornstorlek i SKB:s specifikation. Uppgifter i det fortsatta utvecklingsarbetet är att optimera smidesprocessen både när det gäller materialstruktur och materialutbyte.

Åtta bottenar har svetsats på kopparrör vid TWI genom elektronstrålesvetsning. I ett fall av dessa har en botten svetsats på ett kopparrör med 30 mm väggjocklek. Liksom vid längssvetsning av kopparrör har svetsningen av bottenar utförts i TWI:s högvakuumkammare. Även i detta fall har viss förekomst av porer och ytliga defekter kunnat konstateras /15-5/. En successiv utveckling har dock efterhand medfört ett avsevärt bättre resultat och metoden kan sannolikt utvecklas till en fungerande teknik för svetsning av bottenar på kopparrör. Liksom i fallet med längssvetsning är bedömningen att 30 mm väggjocklek innebär en förenkling. Friction stir welding är även ett alternativ av stort intresse för svetsning av bottenar. Den fortsatta utvecklingen får visa vilken metod som är den tillförlitligaste.

SKI framförde efter FUD-program 98 synpunkten att segjärnets mekaniska egenskaper är starkt beroende av den gjutna kroppens dimensioner. Materialprovning måste därför utföras på de färdiga insatserna. Resultaten av sådana undersökningar kan ligga till grund för förändringar i gjutprocessen. Resultaten ska också fungera som ingångsdata vid de slutliga hållfasthetsberäkningar som SKI anser är nödvändiga. SKB instämmer i detta. I /15-5/ redovisas resultat från sådana undersökningar av insatser. Detta är också ett arbete som kommer att fortsätta i samband med gjutningar av nya insatser. Resultaten kommer även att ligga till grund för optimering av såväl gjutprocessen som järnets specificerade sammansättning.

SKI har framfört vikten av att hållfasthetsanalyser, som ska visa att kapseln uppfyller konstruktionskraven, baseras på tillverkade kapslars verkliga materialegenskaper. När det gäller kopparhöljet ska provningen omfatta både rör, lock och botten tillverkade med de olika metoder som provas samt svetsar utförda med såväl EBW som FSW. Generellt har SKI även påpekat vikten av att SKB tar fram en härledning av acceptanskriterier för tillåtna defekter både i kopparhölje och i gjutna insatser. Konsekvenser ska visas om det finns fler eller större defekter än vad acceptanskriterierna anger. SKB har instämt i detta och en omfattande provning pågår och kommer att fortsätta de närmaste åren.

Utvecklingen av tillverkningsteknik för detaljutformning av gjutna insatser i segjärn har fortsatt. Sammanlagt har 17 insatser tillverkats i segjärn vid fyra olika gjuterier. Det kan konstateras att gjutning av insatser i segjärn med integrerad botten kan utvecklas till en fungerande metod för SKB:s behov /15-5/. Vid de olika gjuterierna har hittills olika formnings- och gjutmetoder provats och detaljkonstruktionen har utvecklats. Under de närmaste åren är målsättningen att optimera materialspecifikation, tillverkningsteknik och kvalitetskontroll samt visa att metoden är tillräckligt utvecklad för serietillverkning. Figur 15-3 visar exempel på tillverkade kapselkomponenter och utställningsföremål.



*Figur 15-3. Exempel på tillverkade kapselkomponenter och utställningsföremål.*

## 15.3 Utvecklingsprogram

Arbetet med provtillverkning av samtliga kapseldelar i full skala kommer att fortsätta de närmaste åren. SKI ansåg i sina kommentarer efter FUD-program 98 att SKB innan tidpunkten för tillståndsansökan måste visa att metoder för tillverkning och kontroll verkligen finns tillgängliga och är tillämpbara för serietillverkning. Detta innebär att ett tillräckligt stort antal kapslar ska ha tillverkats och kontrollerats och kunnat visas uppfylla ställda krav. Något specificerat antal godkända kapslar anges dock inte. Med detta som bakgrund kan nedanstående systematisering av det nödvändiga fortsatta utvecklingsarbetet göras.

### ***Tillverkning av kopparrör med lock och botten***

- Fortsatt tillverkning av sömlösa kopparrör för 50 mm vägg tjocklek och i viss utsträckning för 30 mm vägg tjocklek kommer i första hand att ske med de båda metoderna extrudering och dornpressning. Arbetet kommer att vara inriktat 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.
- Tillverkning av kopparrör med 30 mm vägg tjocklek genom rullformning av valsad plåt och längssvetsning med elektronstrålesvetsning eller friction stir welding ska ses som ett möjligt alternativ, om tillverkningen av sömlösa rör resulterar i oväntade problem.
- Tillverkning av smidda ämnen för lock och botten kommer att fortsätta. Viktiga delmoment i det fortsatta arbetet är att optimera erhållen kornstorlek i de smidda ämnena samt att förbättra materialutbyte och kontrollmetoder. För att förbättra materialutbyte och erhållen kornstorlek kommer olika utformningar av smidesverktyg samt olika processparametrar att provas.
- 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 av de aktuella tillverkningsmetoderna samt genom materialprovning, få kunskap som kan bidra till den optimering av materialspecifikation och tillverkningsteknik som eftersträvas.
- Utveckling av tekniken för svetsning av botten på kopparrör kommer att fortsätta. Svetsning kommer att utföras med såväl elektronstrålesvetsning som friction stir welding vid TWI och vid SKB:s Kapsellaboratorium. Svetsning i full skala kommer under de närmaste åren att kunna utföras vid Kapsellaboratoriet med båda metoderna. Utprovning av metoder för oförstörande provning för botten svetsar kommer att ske parallellt med utvecklingen av provmetoder för förslutningssvetsning.

### ***Tillverkning av gjutna insatser med stållock***

- Fortsatt tillverkning av gjutna insatser i segjärn kommer att genomföras i samarbete med olika gjuteriföretag. I det fortsatta arbetet kommer inriktningen att vara att optimera tillverkningsprocessen, materialspecifikationen och provningsmetoder.
- Stållock till insatser kommer att tillverkas för att täcka behovet vid tillverkning av kompletta kapslar för t ex projekt vid Äspölaboratoriet. Målsättningen med det fortsatta arbetet är att vidareutveckla konstruktionen med tillhörande materialspecifikation och kriterier för kvalitetssäkring.

### 15.3.1 Sammansättning av kompletta kapslar

Ett antal kompletta kapslar kommer att färdigställas bl a för Prototypförvaret i Äspö-laboratoriet men även för demonstration av en kvalitetssäkrad kapseltillverkning. Kapslar för Äspölaboratoriet kommer att ha lock i koppar som skruvas fast. Dessutom kommer kapslar att förslutningssvetsas på Kapsellaboratoriet. Viktiga punkter är dokumentstyrning, hanteringsteknik, bedömning och dokumentation av skador, rengöringsteknik och slutlig kvalitetskontroll.

#### **Kvalitetssäkring**

- Arbetet med kapseltillverkning bedrivs enligt kraven i ISO 9001. Verksamheten beskrivs detaljerat i den befintliga handboken för kapseltillverkning med tillhörande tillverkningsritningar, tekniska specifikationer och rutinbeskrivningar. Kvalitetssystemet utvecklas kontinuerligt och tillhörande handlingar revideras vid behov.
- Ett viktigt område är att fastställa acceptanskriterier för kapselns alla delar inklusive förekommande svetsar. Sådana kriterier är materialkrav och acceptansgränser för såväl ytliga defekter som defekter inuti materialet. En konsekvensanalys ska genomföras som visar vad som händer om det finns fler eller större defekter än vad acceptanskriterierna anger.
- Fastlagda acceptanskriterier avseende defekter måste kunna verifieras med oförstörande provning. Det pågående arbetet med att välja lämplig utrustning och metodik kommer att fortsätta i samarbete med leverantörer och experter vid högskolor och universitet.
- Aktuella tillverkningsprocesser samt kontroll- och provningsförfaranden ska kvalificeras. Detta arbete kommer att systematiseras och bedrivs under de närmaste åren.

### 15.4 Kapselabrik

De tomma kapslarna som bränslet ska kapslas in i kommer att tillverkas i en speciell kapselabrik. I /15-6/ redovisas en preliminär utredning om hur en sådan fabrik skulle kunna utformas. Detta utförande diskuterades även i FUD-program 98. Utredningen av den anläggningen byggde på antagandet att kopparrören skulle tillverkas i fabriken genom rullformning av valsad kopparplåt till rörhalvor som sedan svetsas samman med långsgående elektronstrålesvetsning.

Efter den första utredningen /15-6/ och efter FUD-program 98 har ytterligare analyser utförts av SKB och en alternativ utformning av fabriken har studerats /15-5/, nu med inriktning på tillverkning av kopparrör från sömlösa ämnesrör.

De sömlösa ämnesrören levereras till fabriken från underleverantörer som producerar ämnesrör med metoder som dornpressning eller extrudering. I fabriken maskinbearbetas rören till färdigmått innan svetsning av botten sker. Detta innebär att fabriken blir något mindre och inte kräver lika mycket utrustning och personal som den tidigare.

I övrigt är utformningen av fabriken mycket lik den tidigare. Den grundläggande principen är fortfarande att hanteringen av koppar och segjärn är separerad hela vägen fram till att insatsen lyfts ned i kopparröret. Smidda och eventuellt grovbearbetade ämnen för kopparlock och kopparbottnar maskinbearbetas till färdigmått. Gjutna och grovbearbetade insatser i segjärn levereras till fabriken för slutbearbetning. Ämnen till insats-

lock som skurits ut ur valsad stålplåt färdigbearbetas också i fabriken. Efter rengöring av samtliga delar lyfts insatsen ned i kopparhöljet. Slutligen färdigställs kapseln för leverans till inkapslingsanläggningen.

Hela kapselfabriken, inklusive underhållsverkstad, kontrollaboratorium och kontor beräknas nu omfatta cirka 6 000 m<sup>2</sup> och den totala investeringskostnaden för en nybyggd fabrik med maskiner och övrig utrustning har beräknats till cirka 180 MSEK. Vidare har personalbehovet uppskattats till 21 personer.

Var kapselfabriken kommer att lokaliseras är ännu inte beslutat. Frågor som måste beaktas vid lokaliseringen rör bland annat transporter till och från fabriken samt samhälls-aspekter, 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.

### **Utvecklingsprogram**

- 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 oförstörande provning och övrig kvalitetskontroll kan specificeras mer exakt. En fördjupad utredning av anpassad maskinell utrustning och provningsutrustning i samarbete med potentiella leverantörer kommer att göras. Detta kommer att ge möjlighet till en mer exakt analys av fabrikens layout och investeringskostnader.
- Om utvecklingen av friction stir welding visar att tekniken kan bli aktuell för kapseltillverkning kommer konsekvenserna av detta att behöva utredas och vägas in i fabriks-layout och investeringskostnader.
- Ett led i det pågående arbetet med utveckling av kvalitetssystemet för kapseltillverkning är att finna det nödvändiga nätverket av lämpliga underleverantörer och att skapa en långsiktig och affärsmässig relation med dessa. För den framtida produktionen i kapselfabriken är leveranssäkerhet från olika underleverantörer av fundamental betydelse. I samband med pågående provtillverkning kommer en kontinuerlig bedömning av aktuella leverantörer att fortsätta genom regelbundna kvalitetsrevisioner samt analys av prissättning, leveranssäkerhet och sannolik framtida utveckling.
- För att få en fullständig bild av potentiella osäkerheter kommer en riskanalys av verksamheten i den planerade kapselfabriken att genomföras.

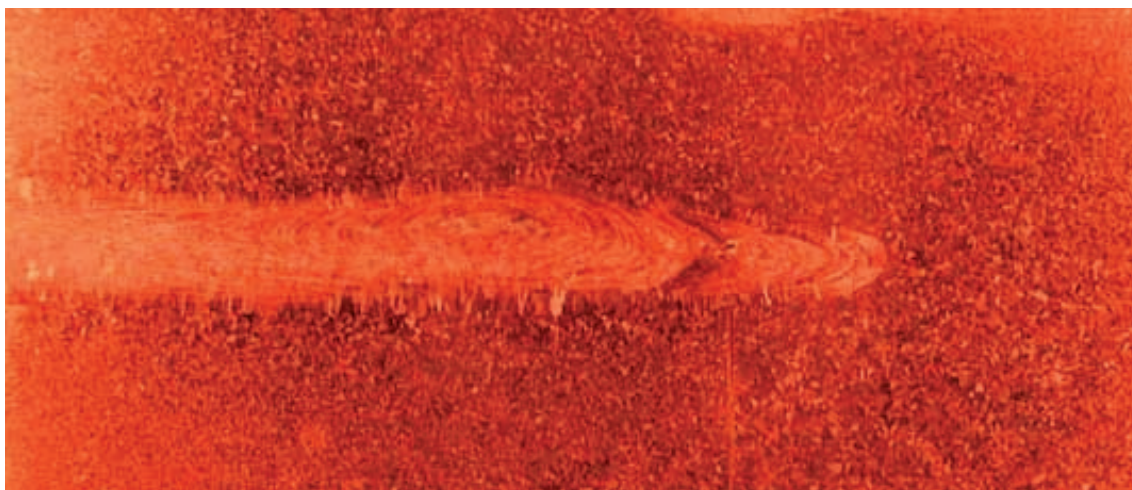
## **15.5 Svetsteknik**

### **15.5.1 Elektronstrålesvetsning**

Utvecklingsarbete med elektronstrålesvetsning vid Kapsellaboratoriet syftar till att utveckla utrustning och svetsparametrar för att komma fram till en stabil process med hög tillförlitlighet, där förslutningssvetsen uppfyller kraven på långtidsegenskaper och hållfasthet.

Elektronstrålesvetsning är en smältsvetsningsmetod. Den bygger på principen att i vakuum skicka en kraftig ström av elektroner med hög rörelseenergi mot det objekt man önskar svetsa. När elektronerna träffar objektet sker en lokal upphettning som gör att materialet smälter, se figur 15-4.





*Figur 15-4. Snittbild av förslutningssvets utförd vid Kapsellaboratoriet. Ytan har etsats så att svetsstrukturen träder fram. Inträngningsdjupet 60 mm.*

Metoden har flera fördelar:

- Tjocka objekt kan svetsas.
- Processen sker utan kontakt med objektet.
- Inget tillsatsmaterial krävs vilket gör att svetsen har samma sammansättning som grundmaterialet.
- Svetsparametrarna är programmerbara och reproducerbara.

Metoden har använts för svetsning i industriell skala sedan 1930-talet. Enbart inom svensk industri finns ett antal utrustningar.

Smältsvetsning av tjockt olegerat koppargods innebär vissa svårigheter på grund av materialets höga värmeledningsförmåga och smältans låga viskositet. För att utveckla elektronstrålesvetsning i tjock koppar startade SKB 1982 ett utvecklingsprojekt vid TWI och en utrustning anpassad för svetsning av kopparkapslar togs fram för att användas i Kapsellaboratoriet.

### **Utvecklingsprogram**

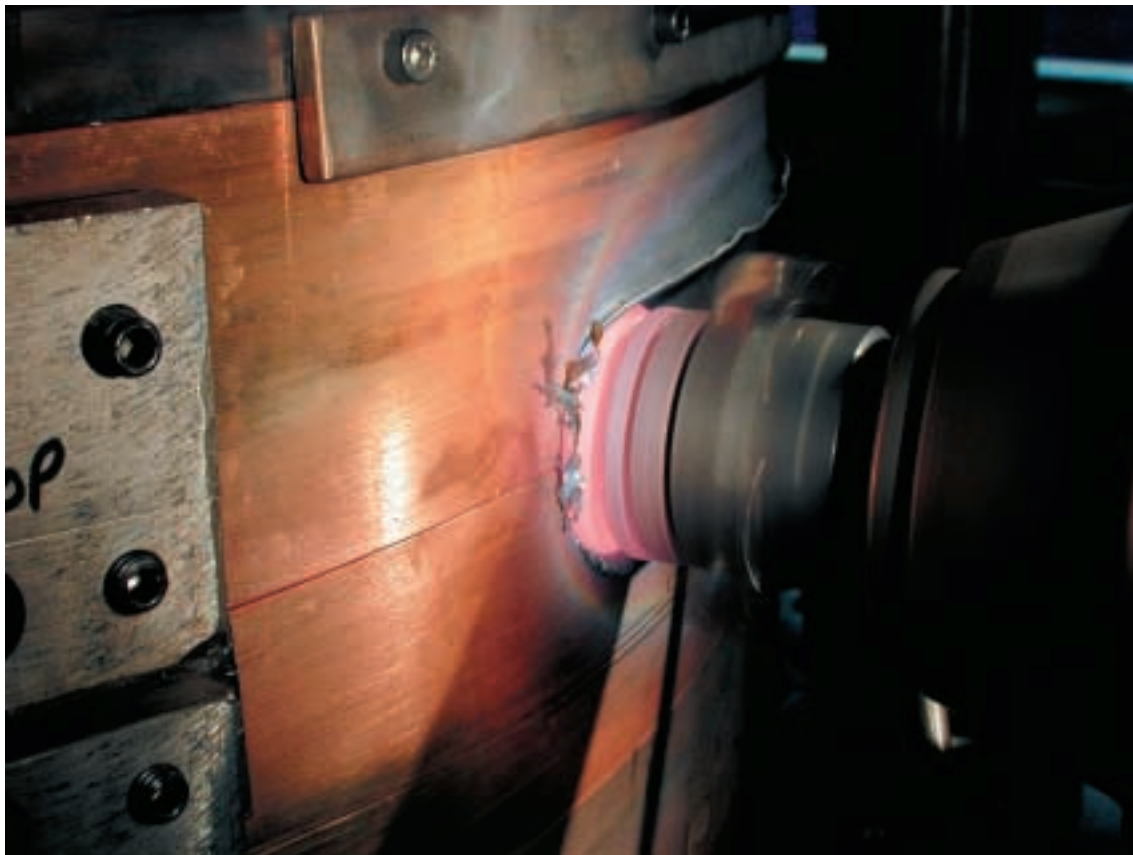
- Utveckling av svetsprocessen för förslutning av kopparkapslar med 50 mm vägg-tjocklek och horisontell svetsfog. Projektet planeras vara avslutat i början av år 2004. Målet är att utveckla process och utrustning för förslutning av 50 mm kopparkapslar med elektronstrålesvetsning på ett sätt som ger erforderliga material- och hållfasthets-egenskaper hos svetsen samt uppfyller produktionskrav avseende produktionstakt och tillförlitlighet.
- Utveckling av svetsprocessen för förslutning av kopparkapslar med 30 mm vägg-tjocklek och horisontell svetsfog. I övrigt samma målsättning och tidsram som för 50 mm vägg-tjocklek.

## 15.5.2 Friction Stir Welding

Den alternativa metoden att foga koppar med friction stir welding kommenterades inte i FUD-program 98. De preliminära studier som då påbörjats av SKB beskrevs däremot kortfattat /15-4/. Efter detta har ett kontinuerligt utvecklingsarbete fortsatt i samarbete med TWI. En sammanfattning av hittills uppnådda resultat redovisas /15-5/. Vissa resultat har även publicerats vid tre konferenser under 1999–2001, /15-7, 15-8 och 15-9/. När projektet påbörjades vid TWI under 1996 var tekniken beprövad och användes i produktionssammanhang för svetsning av i synnerhet aluminiumlegeringar. Koppar i sådan tjocklek som är aktuell för SKB:s kopparkapslar hade däremot aldrig svetsats tidigare med denna teknik. Den fundamentala skillnaden mot elektronstrålesvetsning är att materialet inte smälter vid fogningen.

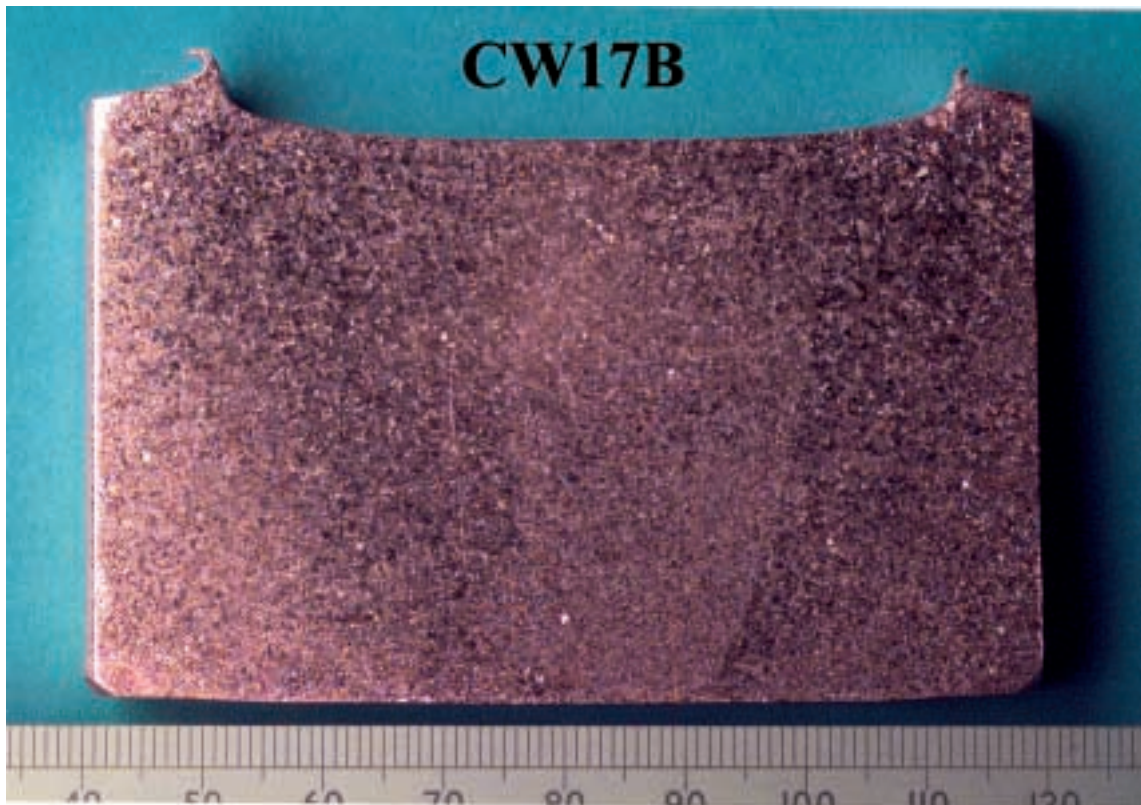
Vid friction stir welding används ett speciellt utformat roterande verktyg. Detta är försett med en spets som pressas ned mellan fogyterna. När verktyget roterar och rör sig längs fogen alstras värme och under rätta förhållanden blir metallen mjuk och formbar och man får en sammanvällning av delarna, se figur 15-5. I och med att metallen inte smälter och att temperaturen, genom kontroll av processparametrarna, kan hållas på en relativt låg nivå fås en finkornig, homogen struktur i svetsen, se figur 15-6.

Utvecklingsarbetet i samarbete med TWI har visat att 50 mm tjock koppar kan fogas samman med friction stir welding och att processen sannolikt kan utvecklas till en alternativ metod för svetsning av kopparkapslar. Under de första delprojekten genomfördes rak fogning av kopparplåtar i successivt ökad tjocklek, från 10 till 50 mm, i syfte att få en preliminär utprovning av verktygsutformning och processparametrar. I nästa utvecklingssteg har en speciell maskin konstruerats och byggts för svetsning av lock eller bottenar i



*Figur 15-5. Svetsning med friction stir welding i laboratorietrustningen på TWI.*





*Figur 15-6. Materialstruktur i svets utförd med friction stir welding.*

full storlek på kopparrör. Maskinen är fullskalig när det gäller diameter och godstjocklek på lock, bottenar och rör men kan inte i nuvarande utformning svetsa kompletta kapslar i full längd. Svetsningarna utförs på kopparrör med en längd av cirka två meter.

Ett antal fullständiga svetsar runt hela kapselomkretsen har genomförts med 50 mm väggstjocklek i kopparröret och med bra resultat. Erfarenheterna hittills har visat att verktygsmaterial och verktygsutformning samt en rad olika processparametrar är helt avgörande för resultatet. Även i detta fall är bedömningen att svetsning i 30 mm material kommer att vara lättare.

SKI framförde efter FUD-program 98 och med kännedom om det påbörjade utvecklingsarbetet vid TWI att man ser positivt på att alternativa svetsmetoder utreds.

### **Utvecklingsprogram**

Det grundläggande utvecklingsarbetet vid TWI med den befintliga utrustningen kommer att fortsätta under år 2001 och vid behov under 2002. Arbetet är inriktat på att fortsätta utvecklingen av verktyg och processparametrar. Viktigt är även att utveckla teknik för kontroll och styrning av vissa processparametrar. Svetsning kommer att utföras i både 50 och 30 mm tjocka kopparrör. Utförda svetsar utvärderas kontinuerligt med metallografi och oförstörande provning.

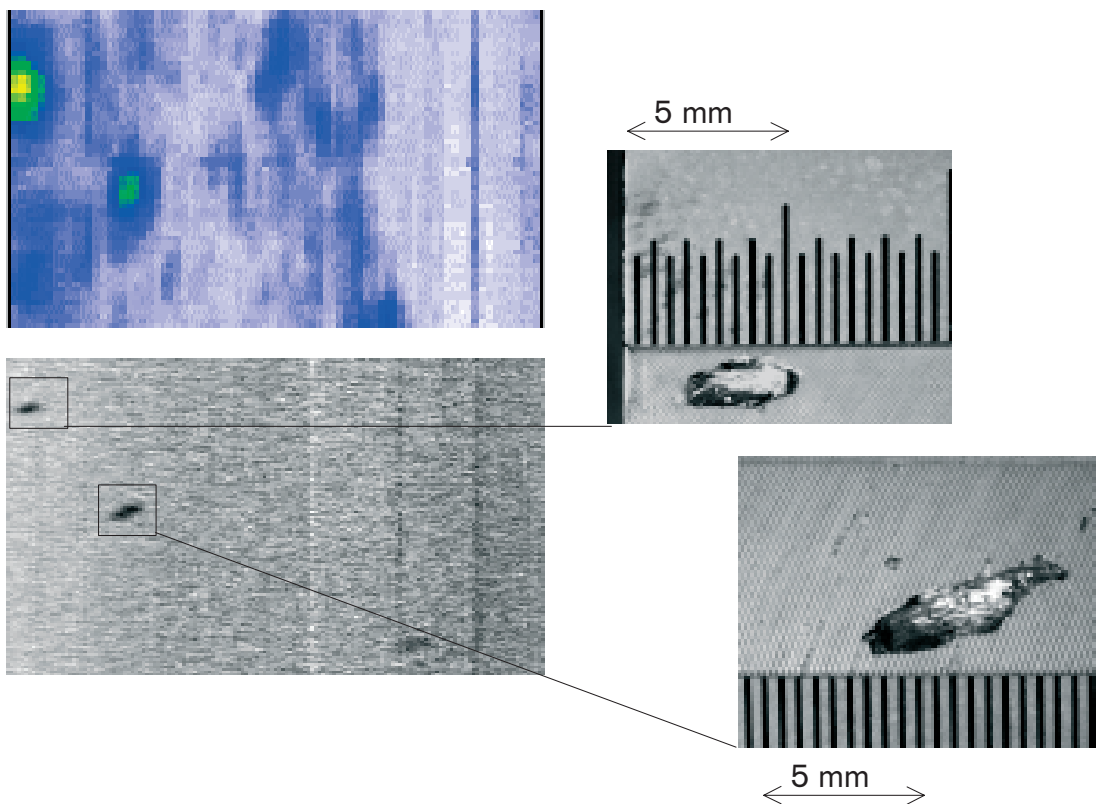
- Grundliga materialundersökningar av svetsar pågår och kommer att fortsätta vid Institutet för Metallforskning i Stockholm. På prover uttagna på olika ställen runt svetsarnas hela omkrets kommer hållfastheten att provas med dragprovstavar och krypprovstavar. Vidare kommer svetsarna att undersökas metallografiskt genom mikroskopering och vid behov med mikrosondanalys.

- Teknik för oförstörande provning kommer att utvecklas bl a i samarbete med Uppsala Universitet.
- Ett problem med friction stir welding är att efter ett fullbordat varv runt kapseln kommer verktyget att lämna ett utgångshål av samma storlek som den roterande spetsen. Det finns alternativa metoder att lösa detta problem som kommer att provas och utvärderas i samarbete med TWI.
- En projekt i syfte att överföra tekniken för friction stir welding till Kapsellaboratoriet har påbörjats. För svetsning av kapslar i full längd planeras uppförandet av en helt ny utrustning speciellt anpassad för ändamålet. Syftet är att kunna prova ut tekniken för förslutningssvetsning av kapslar på motsvarande sätt som med elektronstrålesvetsning. Den nya utrustningen beräknas kunna tas i bruk i slutet av år 2002.

### 15.5.3 Kvalificering av svetsmetod

Den eller de metoder för svetsning som ska användas i den slutliga processen med att tillverka och försluta kapslar kommer att genomgå kvalificering. SKB kommer att ta fram ett kvalificeringsunderlag som belyser metodens tillförlitlighet, prestanda och svetsens egenskaper.

Ett program för kvalificeringen kommer att tas fram till tidpunkten för ansökan om tillstånd att få uppföra inkapslingsanläggningen vilket är planerat till år 2005. Kvalificering av metod/metoder görs i samband med drifttagning av inkapslingsanläggningen.



**Figur 15-7.** Jämförelse mellan resultat erhållna med ultraljudprovning (övre bild) och radiografering av samma område. Till höger visas bilder i 5,3 ggr förstoring av samma diskontinuiteter. Strecken på bilden är en inlagd millimeterskala.

## 15.6 Oförstörande provning

Större delen av det praktiska arbetet med utveckling av metoder för oförstörande provning görs vid Kapsellaboratoriet. Provning av svetsen sker med flera metoder, se figur 15-7. För att påvisa diskontinuiteter med volym (porer) radiograferas hela svetsen. Som strålkälla används en linjäraccelerator med maximal fotonenergi 9 MeV och dosrat 1,8 kG/h. Systemet har erforderliga grundprestanda för att penetrera aktuell koppardtjocklek och även tillräcklig dosrat för att ge acceptabel undersökningstid och försumbar inverkan på radiograferingsresultatet från strålningen från en kapsel med bränsle. Detektorsystemet är digitalt med upplösningen 0,4 x 0,4 mm.

Förekomst av diskontinuiteter som saknar volym, till exempel bindfel, undersöks med ultraljudprovning, matrissökare phased array. Avsökning sker genom att sökarhuvudet sätts an mot kapsellokets översida som roteras. Sökarhuvudets aktiva del består av 80 skivelement i en stapel. Med styrning från en dator kan elektronisk scanning, vinkling och fokusering i objektets radiella ledd åstadkommas. Fokuseringen i objektets tangentiella led är fast och bestäms av sökarhuvudets geometri.

För att påvisa ytnära diskontinuiteter utvecklas virvelströmsprovning. Vid provningen inducerar en spole en svag virvelström i svetsen. Diskontinuiteter orsakar mätbara förändringar i det sekundärfält som virvelströmmen åstadkommer. För att virvelströmsprovningen ska kunna utföras måste svetsrågen först bearbetas bort.

Utvärdering av resultaten från den oförstörande provningen sker genom förstörande prov där diskontinuiteternas verkliga storlek jämförs med de uppmätta resultaten.

### **Utvecklingsprogram**

- Vid Uppsala Universitet pågår sedan fem år ett forskningsarbete kring ultraljudprovning av elektronstrålesvetsade kopparkapslar. Arbetet, som har flera delprojekt, syftar till att öka tillförlitligheten vid ultraljudprovning av svetsar i koppar och möjligheterna att karakterisera defekter i svetsen, den värmepåverkade zonen och grundmaterialet. En viktig del är utvecklingen av algoritmer för reduktion av brus från korngränserna i kopparen. Andra forskningsområden har varit modellering av ultraljudets utbredning i koppar och oförstörande karakterisering av kopparmaterial. De resultat, som kommer fram inom projektet kommer att implementeras på 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. Implementering av resultaten pågår på Kapsellaboratoriet.
- Utveckling av metoder och utrustning för oförstörande provning av kapslar förslutna med elektronstrålesvetsning. Projektet planeras att vara avslutat i början av år 2004.
- Utveckling av metoder och utrustning för oförstörande provning av kapslar förslutna med friction stir welding. Projektet är planerat att påbörjas under år 2003.
- Utveckling av radiografiska metoder med förbättrade prestanda avseende lokalisering och detektering av diskontinuiteter i förslutningssvetsen.

### **15.6.1 Kvalificering av oförstörande provningsmetoder**

De metoder för oförstörande provning som kommer att användas i den slutliga processen att tillverka och försluta kapslar kommer att genomgå kvalificering.

I kvalificeringen kan urskiljas två milstolpar. Den första milstolpen inträffar 2005 då SKB planerar att ansöka om tillstånd att få uppföra en inkapslingsanläggning. I detta skede är kvalificeringen inriktad mot tekniska motiveringar. Vad tekniska motiveringar innebär framgår av ENIQ (European Network for Inspection Qualification) Recommended Practice 2 /15-10/. SKB avser att tillämpa denna rekommendation för att dokumentera metoderna för oförstörande provning.

Den andra milstolpen utgör drifttagandet av inkapslingsanläggningen. Då avser SKB att kvalificera metoderna för oförstörande provning utgående från ENIQ Recommended Practice 4 /15-11/.

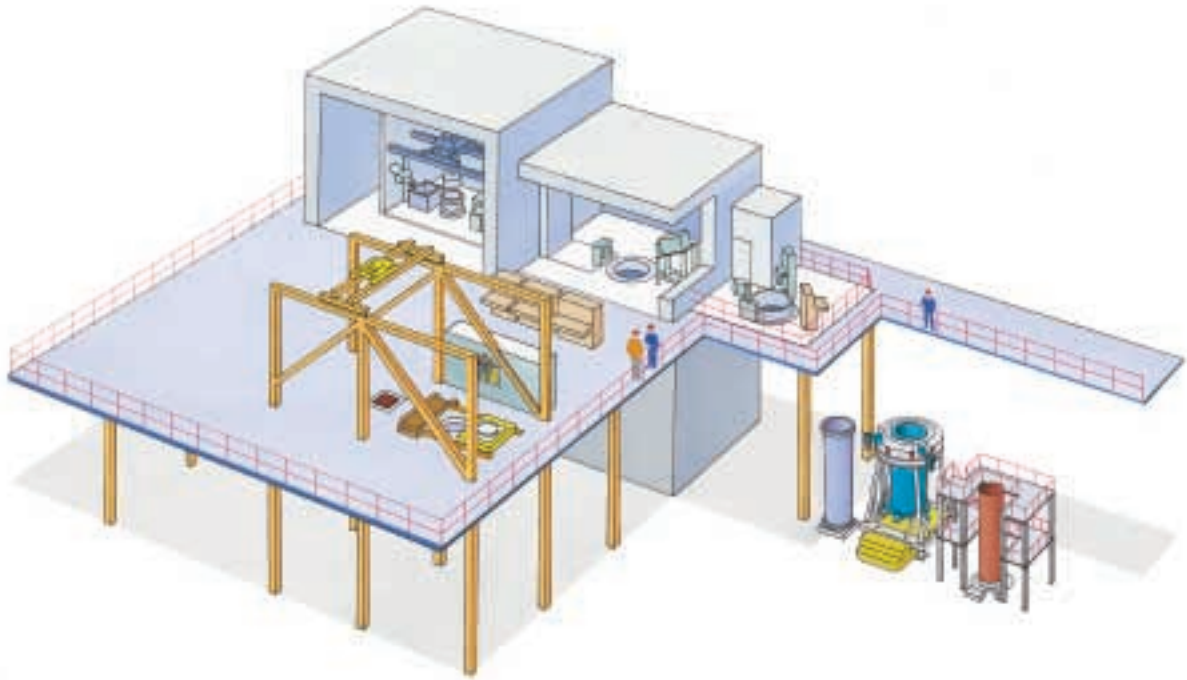
## **15.7 Kapsellaboratoriet**

Vid Kapsellaboratoriet utvecklar och demonstrerar SKB metoder för förslutning och oförstörande provning av kopparkapslar avsedda för djupförvaring av använt kärnbränsle, se figur 15-8. Verksamheten vid Kapsellaboratoriet är applikationsinriktad och utgör länken mellan forskning/utveckling och den planerade produktionen i inkapslingsanläggningen. Utvecklingsarbetet sker i projektform. Vid Kapsellaboratoriet finns kompetens inom svetsning, oförstörande provning, elektronik och mekaniska system. Verksamheten bedrivs vid varvsområdet i Oskarshamn.

Projekteringen av Kapsellaboratoriet inleddes 1995 och verksamheten startade successivt under 1998. Inkörningsproblem med flera av de nyutvecklade systemen gjorde dock att processutvecklingen drog ut på tiden. Sålunda åstadkoms under året 1999 trots intensiva ansträngningar endast fyra svetsar. Under år 2000 löstes de flesta problemen och utvecklingsverksamheten tog fart. Bland annat svetsades tolv kompletta lock på kopparrör och ett flertal svetsningar gjordes i mindre provblock.

### **15.7.1 Utvecklingsprogram**

Utvecklingsinsatserna i laboratoriet är för närvarande i första hand inriktade mot process och utrustning för elektronstrålesvetsning och oförstörande provning. Det finns starka synergieffekter i att driva utvecklingen inom dessa områden parallellt och i samma organisation. Genom tillgången till metoderna för oförstörande provning i laboratoriet erhålles snabb återmatning av resultaten från svetsproven. Dessutom erhålles ett mycket stort undersökningsmaterial som ger en bred erfarenhet för att undersöka prestanda hos den oförstörande provningen och utveckla dessa metoder. Genom samordning mellan projekten vid sektionering av svetsen för metallografiska studier kan undersökningsmaterialet utnyttjas på bästa sätt. Då utvecklingen sker i fullskala vinnas även viktiga erfarenheter beträffande anläggningsutformning och mekaniska hjälpsystem som kontinuerligt förbättras.



*Figur 15-8. Vid SKB:s Kapsellaboratorium i Oskarshamn prövas tekniken för förslutning och oförstörande provning.*

Programmet för det fortsatta arbetet är givetvis den närmaste tiden inriktat på utveckling av metoder för förslutning och oförstörande provning vilket beskrivs ovan. Förutom detta planeras hanteringsprov och förbättring av kapaciteten för förstörande provning enligt nedan:

- Installation av utrustning för urborring, beredning och granskning av makroprov från svetsar.
- Sammanhängande provserier för att verifiera utrustningarnas tillförlitlighet och inkapslingsanläggningens produktionskapacitet.
- Utprovning av metoder för reparation av underkända svetsar.
- Utprovning av metoder för borttagning av lock samt urlastning av bränsle i händelse av underkänd svets.
- Utbildning av drift- och underhållspersonal till inkapslingsanläggningen.

### **15.7.2 Demonstration**

Kapsellaboratoriet är till stora delar uppbyggt på samma sätt som den planerade inkapslingsanläggningen och utgör en fullskalig demonstrationsanläggning. En viktig skillnad är att radioaktivt material inte hanteras i Kapsellaboratoriet. Kapsellaboratoriet utgör en viktig resurs för att demonstrera inkapslingstekniken för såväl myndigheter som allmänhet. Under 2000 besöktes anläggningen av cirka 3 000 personer.

## 15.8 Inkapslingsanläggning

För att kapsla in det använda kärnbränslet behöver SKB bygga en inkapslingsanläggning. I denna anläggning ska samtliga bränsletyper från de svenska kärnkraftverken kunna kapslas in. Kapslarna ska förslutas med högt ställda kvalitetskrav och ska kontrolleras noga innan de transporteras till djupförvaret. Det ställs även höga krav på driftsäkerheten så att kapslar kan levereras i den takt som deponeringen i djupförvaret kräver.

Inkapslingsanläggningen ska utformas så att personalen och omgivningen skyddas mot strålning. Detta innebär bland annat att själva inkapslingen kommer att ske avståndsmåttat bakom kraftigt strålskärmande väggar. Även hanteringen av kapslar kommer att ske fjärrstyrt i så stor utsträckning som möjligt. Under arbetet med att projektera inkapslingsanläggningen utnyttjas erfarenheterna från CLAB, SFR och Kapsellaboratoriet men även från olika utländska anläggningar.

Arbetet med att projektera inkapslingsanläggningen sker, liksom för djupförvaret, i fem steg. I det första steget (skede E) görs en förstudie av anläggningens utformning. Därefter genomförs ett projekteringssteg (skede D) som ligger till grund för ansökan om att få bygga inkapslingsanläggningen. Medan ansökan behandlas av myndigheterna tas det konstruktionsunderlag (skede C) fram som behövs för att börja bygga anläggningen. I nästa steg (skede B) som pågår under tiden som anläggningen byggs görs detaljkonstruktionen. När inkapslingsanläggningen är färdigbyggd och driftsättning pågår avslutas projekteringsarbetet med att byggnadsutformning och konstruktioner slutdokumenteras (skede A).

### 15.8.1 Lokalisering av inkapslingsanläggningen

Inkapslingsanläggningen kan antingen lokaliseras vid CLAB, vid djupförvaret, vid en befintlig kärnteknisk anläggning eller på någon annan plats. Det är en fördel om anläggningen kan samordnas med befintlig verksamhet och om det finns tillgång till kompetens och erfarenhet av radiologisk verksamhet. Vidare måste transportererna av använt kärnbränsle, resursutnyttjande, miljöpåverkan och samhällsliga aspekter beaktas vid lokaliseringen.

Huvudalternativet för lokalisering av inkapslingsanläggningen är vägg i vägg med CLAB på Simpevarpshalvön i Oskarshamns kommun, eftersom detta alternativ ger en rad fördelar /15-12, 15-13/. En av fördelarna är att den erfarenhet av bränslehantering som finns hos personalen vid CLAB bäst kan tas tillvara om inkapslingsanläggningen byggs på samma plats. Vidare kan flera av de befintliga systemen och anläggningsdelarna i CLAB utnyttjas även för inkapslingsprocessen. Ingen ny mark behöver tas i anspråk och det krävs inga nya vägar. Dessutom ger CLAB och Oskarshamnsverket värdefull tillgång till andra kärntekniska resurser, t ex kompetens inom strålskydd och hantering av radioaktivt avfall.

En lokalisering vid CLAB är även gynnsam från transportsynpunkt, eftersom överföringen av bränsle från mellanlagring till inkapsling då inte kräver några transporter utanför anläggningarna. Om inkapslingsanläggningen inte lokaliseras vid CLAB måste bränslet först transporteras på samma sätt som vid dagens transporter från kärnkraftverken till CLAB. Transporterna till djupförvaret blir enklare om bränslet är inkapslat. Antalet transporttillfällen blir däremot fler jämfört med en lokalisering vid djupförvaret, eftersom en transportbehållare med en kapsel rymmer färre bränsleelement än dagens transportbehållare för oinkapslat bränsle. Om inkapslingsanläggningen varken lokaliseras vid CLAB eller vid djupförvaret ökar transportbehovet ytterligare.

Projekteringen baseras på en förläggning vid CLAB, men utformningen görs så att anläggningen kan anpassas till andra lokaliseringar. Alternativet med lokalisering till djupförvaret har utretts /15-14/. Inkapslingsanläggningen är inte beroende av djupförvarsanläggningen varför detta alternativ kan anses täcka även övriga möjliga lokaliseringalternativ. För- och nackdelar med olika lokaliseringar kommer även att framgå av den miljökonsekvensbeskrivning som redovisas i samband med tillståndsansökan.

### **15.8.2 Anläggningsutformning**

Arbetet med att projektera en inkapslingsanläggning förlagd vid CLAB påbörjades 1993 och huvuddragen av detta arbete presenterades i FUD 95. Efter 1995 har inkapslingsanläggningen vidareutvecklats och vissa förändringar har skett. Det arbete som pågår i Kapsellaboratoriet kommer att resultera i ytterligare förändringar. En utförlig beskrivning av den nuvarande utformningen ges i /15-15/. Anläggningen är konstruerad så att det finns flexibilitet för framtida ändringar och eventuella utbyggnader. Det finns även viss flexibilitet om kapselns utformning skulle ändras i framtiden.

Inkapslingsanläggningen omfattar en inkapslingsbyggnad och förråd för fyllda transportbehållare. Inkapslingsbyggnaden är tänkt att byggas vägg i vägg med CLAB:s mottagningsbyggnad och vara ansluten till bränslehissen som förbinder mottagningsbassängerna med förvaringsbassängerna. Ett flertal av de befintliga systemen i CLAB, t ex kylsystem, vattenreningsystem och elsystem, utökas för att även täcka behoven i inkapslingsanläggningen.

I ett första skede kommer endast använt bränsle att kapslas in, men anläggningen är förberedd för att senare kompletteras med utrustning för hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Inkapsling av använt bränsle och hantering av övrigt avfall kommer att ske i separata kampanjer.

### **15.8.3 Säkerhet vid drift**

För att skydda personal och personer i omgivningen ställs höga krav på säkerheten vid driften av inkapslingsanläggningen. De uppställda kraven gäller bland annat strålskydd och brandskydd. Det använda bränslet ska alltid hanteras utan att det finns risk för kriticitet. Inkapslingsanläggningen ska uppfylla säkerhetskraven för kärntekniska anläggningar.

Under konstruktionsarbetet analyseras tänkbara missöden. Inkapslingsanläggningen ska konstrueras så att en skada vid ett eventuellt missöde minimeras för att inte ge några allvarliga utsläpp av radioaktiva ämnen. Samtliga lyftanordningar för bränsle och kapslar ska säkerställa att hanteringen kan avslutas till ett säkert läge även om det blir strömavbrott. Säkerheten i inkapslingsanläggningen beskrivs närmare i /15-15/.

### **15.8.4 Safeguards**

Kraven på safeguards från såväl svenska som internationella kontrollmyndigheter ska tillgodoses i inkapslingsanläggningen. I konstruktionsskedet beaktas detta genom att utrymmen ges i layouten för utrustning som kan krävas för kontroll. Anläggningen ska utformas så att möjligheterna att avleda kärnämne försvåras.



Varje kapsel kommer att få en unik identitet som är möjlig att visuellt kontrollera. Det administrativa safeguardssystemet håller reda på vilka bränsleelement som finns i varje kapsel, visuell verifiering av bränslets identitet kan göras innan kapslarna försluts. Efter förslutning och kontroll placeras kapslarna i transportbehållare. Även transportbehållarna har en unik identitet vilket administrativt kopplas till innehållet och möjliggör kontroll. Transportbehållarna placeras i ett förråd som kan övervakas i väntan på transport till djupförvaret. Det totala antalet behållare som behövs för transportererna beror på den geografiska placeringen av djupförvaret.

CLAB är idag ett MBA (Material Balance Area). Avsikten är att inkapslingsanläggningen ska tillhöra samma MBA för att bli underlätta den administrativa hanteringen.

### 15.8.5 Inkapslingsprocessen

Tomma kapslar transporteras från kapselfabriken till inkapslingsanläggningen i speciella transportlådor som förhindrar korrosion under transporten. När kapslarna anländer till inkapslingsanläggningen kontrolleras de noga innan de förs vidare in i inkapslingsprocessen.

För att transportera bränsle från lagringsbassängerna i CLAB till bassänger i inkapslingsanläggningen används den befintliga bränslehissen. Liksom i CLAB har vattnet i inkapslingsanläggningens bassänger till uppgift att dels kyla det använda bränslet och dels skärma av strålningen. I inkapslingsanläggningen kontrolleras först bränslets identitet med hjälp av en kamera. Därefter lastas elementen om och placeras i en transportkassett som har plats för tolv BWR-element eller fyra PWR-element, dvs samma antal element som får plats i en kapsel. Vid omlastningen kan elementen passera en mätstation för att verifiera t ex utbränningsgrad och resteffekt.

När en transportkassett är fylld förs den till en vagn som befinner sig i det nedre läget på en ramp i en av bassängerna. Vagnen med kassetten förflyttas uppför rampen tills kassetten är över vattenytan. För att skydda personalen från strålning sker all hantering av bränsle, från och med detta moment, bakom strålskärmande väggar eller med strålskärmad utrustning.

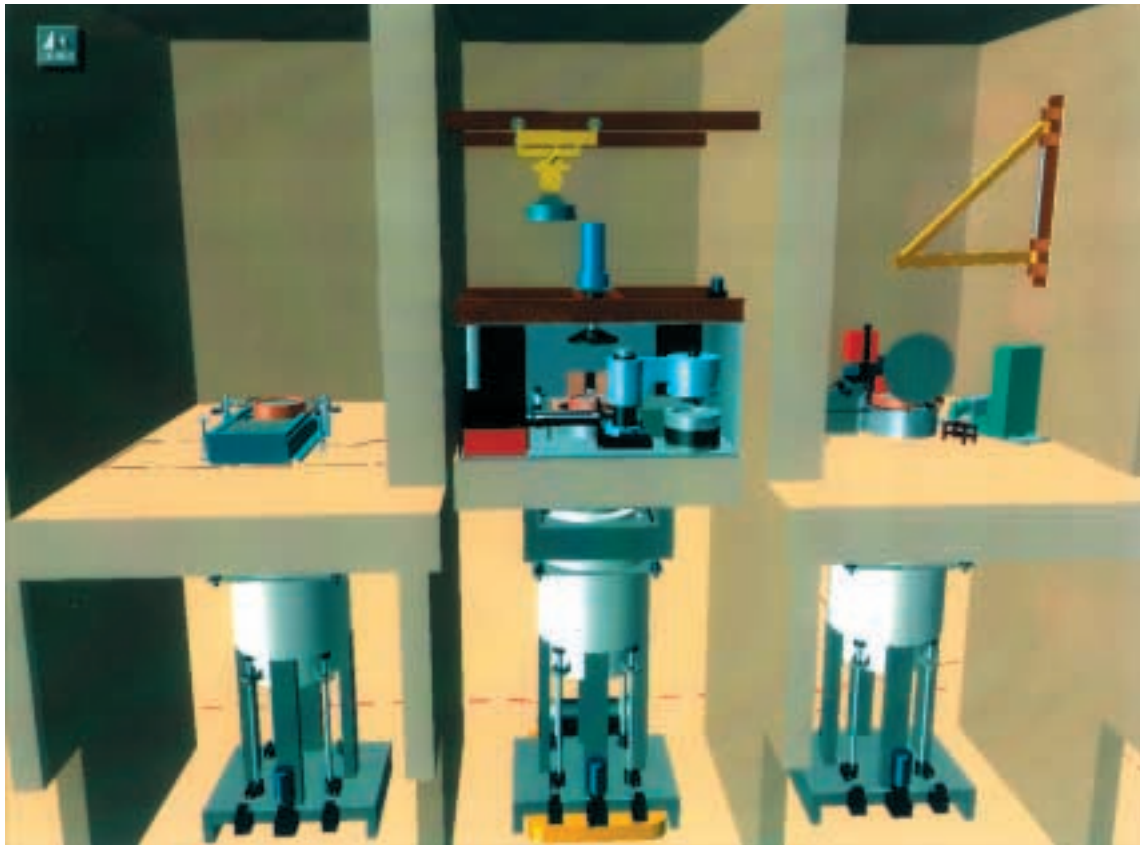
Vid rampens övre läge lyfts kassetten över till en hanteringscell. I cellen placeras kassetten i en torkposition där bränslet torkas med varm luft. När bränslet är torrt lyfts elementen ur och placeras i en kapsel som är dockad till en annan del av cellen. Kapseln befinner sig i en strålskärmad lastbärare som används för förflyttning av kapslar inom anläggningen. När kapseln är fylld skruvas ett stållock fast på insatsen. Lastbäraren hämtas därefter av en fjärrstyrd luftkuddetruck.

Kapseln förflyttas till en station där tätheten hos stållocket kontrolleras och fogytan inspekteras, se figur 15-9.

I nästa station dockas kapseln till en vakuumkanmare. Luften i kammaren pumpas ur så att det även blir vakuum i spalten mellan kopparkapseln och den gjutna insatsen. Kopparklocket, som har transporterats till stationen separat, placeras på kapseln och försluts med elektronstrålesvetsning, se figur 15-9.

Bearbetning av svetsen och oförstörande provning sker i en separat station, se figur 15-9. När en kapsel har blivit godkänd vid den oförstörande provningen görs en slutlig maskinbearbetning av svetsen. Därefter förs kapseln till en position där den lyfts upp ur lastbäraren och förs över till nästa station. Detta lyft görs med en speciell kapselhanteringsmaskin som även används för att placera tomma kapslar i lastbärare. I stationen kontrol-





*Figur 15-9. Tre stationer i inkapslingsanläggningen: kontroll av insatsens täthet, svetsning samt oförstörande provning och maskinbearbetning av svets.*

leras att kapseln inte är kontaminerad genom att strykprover tas på kapselns utsida. Stationen är utrustad med högtrycksvatten som används om det skulle visa sig att kapseln behöver dekontamineras.

I det sista momentet i inkapslingsbyggnaden lyfts kapseln över till en transportbehållare. Kapseln sänks ned i behållaren som därefter förses med ett lock. Med en travers lyfts den fyllda transportbehållaren till en lastbärare som är placerad i en transportsluss. Behållaren transporteras ut ur anläggningen med hjälp av ett specialbyggt fordon. Liknande hantering av transportbehållare sker idag rutinmässigt i CLAB. Från inkapslingsbyggnaden körs kapseln antingen direkt till djupförvaret eller till ett förråd för fyllda transportbehållare.

### **Hantering av ej godkända kapslar**

Om svetsen blir underkänd vid den oförstörande provningen, men innehåller defekter som går att reparera, förs kapseln tillbaka till svetsstationen där den svetsas om. Därefter kontrolleras svetsens kvalitet på nytt. I de fall då svetsen ej går att åtgärda genom omsvetsning ställs lastbäraren med den underkända kapseln åt sidan, så att den normala produktionen inte hindras.

Vid lämpligt tillfälle transporteras kapseln tillbaka till stationen för oförstörande provning och maskinbearbetning där kopparlocket med hjälp av fräsmaskinen skärs upp. Kopparlocket lyfts sedan av i svetsstationen och därefter transporteras kapseln till hanteringscellen. Där lastas bränslet över i en tom transportkassett som står i en av torkpositionerna.

Kapseln dekontamineras och kopparhöljet skickas till återvinning. Insatsen återanvänds i en ny kapsel. De urlastade bränsleelementen i hanteringscellen lastas över i en ny kapsel.

### **Hantering av skadat bränsle**

Vid drift av kärnkraftverken har kapslings-skador uppstått på en mindre mängd bränslestavar.

Det finns även en möjlighet att bränsleskadorna skulle kunna uppstå under transporten från kraftverken till CLAB, även om detta hittills inte skett. På CLAB finns rutiner för hur omhändertagande av transportskadat bränsle ska ske.

De bränsleelement som skadas under driften vid kraftverken och som innehåller stavar med skador innebärande att bränslekutsar kan ramla ur stavarna demonteras och stavarna tas om hand på speciellt sätt före transport till CLAB. Bränsleelement och stavkassetter innehållande stavar med mindre omfattande skador transporteras till CLAB i skyddsboxar. På CLAB kan bränsleelementen antingen lyftas ur skyddsboxarna före förvaring eller förvaras i boxarna.

De skadade bränsleelement som inte förvaras i skyddsbox hanteras i inkapslingsanläggningen på samma sätt som intakt bränsle. Bränsle som förvaras i skyddsbox måste före placering i kapseln lyftas ur skyddsboxen vilket görs i hanteringscellen. I cellen kan även visuellt kontrolleras att skyddsboxen är tom efter att bränslet lyfts ur. Den tomma skyddsboxen förflyttas tillbaka till CLAB.

### **15.8.6 Mellanlagring av fyllda kapslar**

Inom det inhägnade området för CLAB och inkapslingsanläggningen planerar SKB att bygga ett förråd där transportbehållare med färdiga kapslar kan mellanlagras i väntan på leverans till djupförvaret. Förrådet byggs i sektioner, där varje sektion utgörs av en betongplatta i en byggnad som rymmer cirka tio transportbehållare. Genom att bygga i sektioner kan lagringskapaciteten byggas ut successivt.

Mellanlagring av transportbehållare med kapslar kan även ske i ett liknande förråd vid djupförvaret. Detta ger ökad flexibilitet och minskar risken för störningar om leveranserna av kapslar försenas. Antalet transportbehållare som behöver få plats i de två förråden beror på var djupförvaret och inkapslingsanläggningen lokaliseras.

### **15.8.7 Inkapslingsanläggning lokaliserad till djupförvaret**

SKB har genomfört en förstudie av en inkapslingsanläggning fristående från CLAB /15-14/. Den fristående inkapslingsanläggningen förutsätts vara placerad vid djupförvarets ovanjordsdel.

Den huvudsakliga tekniska skillnaden mellan den projekterade inkapslingsanläggningen vid CLAB och vid djupförvaret är hur bränslet hanteras och förbereds innan själva inkapslingen. Bränslemottagningen vid inkapslingsanläggningen vid djupförvaret sker torrt, dvs inga bassänger används. Bränslemottagningens tekniska lösning har granskats av två oberoende internationella företag.

Befintliga CLAB 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 utrustning.

Rent tekniskt föreligger goda förutsättningar för att kunna uppföra en inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret.

Nedan följer en kort processbeskrivning för inkapslingsanläggningen vid djupförvaret.

De bränsleelement som ska kapslas in förflyttas från förvaringsbassängerna via bränslehisnen in i CLAB:s 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 blivit full monteras locket på och den lyfts över till en nedkylningscell. Vattnet dräneras ut och ett torksystem ansluts till behållaren. Varm luft cirkuleras genom bränslet under natten. Under nästkommande arbetsdag kontrolleras torrheten i transportbehållaren samt dess ytrenhet. Slutligen monteras stötdämpare varefter behållaren transporterats till inkapslingsanläggningen vid djupförvaret.

Bränslet anländer sorterat och torrt till inkapslingsanläggningen, vilket är en förutsättning då det inte finns några bassänger i anläggningen. Fyra bränsletransportbehållare tas emot varje vecka. Endast en behållare i taget kan lossas och detta sker i transportslusen. 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 spridning av luftburen aktivitet 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 lufttryck 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 bränsle ska flyttas till en kapsel lyfts först kapselinsatsens stållock upp av magneter varpå bränsleelement kan placeras i kapseln.

När kapseln blivit fylld monteras kapselinsatsens stållock. De nu efterföljande momenten med locksvetsning och oförstörande provning motsvarar de för inkapslingsanläggningen vid CLAB, beskrivna ovan.

### **Utvecklingsprogram**

För att kunna optimera djupförvaret är det av stor betydelse att med hög noggrannhet veta vilken resteffekt respektive bränsleelement har innan det placeras i en kapsel för djupförvaring. Den sammanlagda utvecklade resteffekten i kapseln får inte bli högre än att den kan kylas bort av sin omgivning i berget. Yttemperaturen på kopparkapslarna i djupförvaret ska vara under 100 °C. Detta medför att kapslarna måste ha ett visst avstånd mellan sig i djupförvaret. Hög resteffekt alternativt stor osäkerhet om resteffektens storlek innebär att avståndet mellan kapslarna måste vara större vilket sammanfattningsvis leder till att djupförvarets underjordsdel blir större och dyrare.

Av ovanstående framgår betydelsen av att kunna bestämma bränslets resteffekt med hög noggrannhet. De kalorimetriska resteffekt-mätningar som har genomförts i den befintliga läcksökningsutrustningen på CLAB har visat sig ha dålig tillförlitlighet. Ny utrustning ska därför konstrueras och installeras i CLAB för att få fram resteffektvärden med bättre noggrannhet. Den nya kalorimetern, vilken även kommer att kompletteras med gamma-prober för mätning av effektförluster i kalorimetern orsakade av ej absorberad gamma-strålning, kommer att drifställas under 2001. Ett flertal mätserier kommer därefter att göras på ett urval av befintliga bränsleelement i CLAB.

Inkapslingsprocessen kommer att ses över ytterligare, utöver den översyn av bassängdelarna som avslutades under 2000, för att undersöka om en vidareutveckling kan göras. Erfarenheterna från Kapsellaboratoriet kommer också att inarbetas.

Projekteringen av SKB:s inkapslingsanläggning har pågått under cirka tio år. Under arbetets gång har ett flertal alternativa förslag behandlats. Vissa har förkastats medan andra har vidareutvecklats. Ett flertal väsentliga frågor har framkommit som en följd av projekteringsarbetet. Dessa kommer att behandlas under tiden fram till tillståndsansökan.

I den inkapslingsanläggning som SKB projekterar är svetskammaren utformad för elektronstrålesvetsning. En studie kommer att genomföras för att utvärdera konsekvenserna för inkapslingsanläggningens layout om friction stir welding i stället skulle användas som förslutningsmetod för kapslar.

Med hänsyn till SKB:s lokaliseringsarbete och övergripande tidsplan ska en tillståndsansökan om att få uppföra inkapslingsanläggningen kunna skickas in år 2005. I ansökan kommer en preliminär säkerhetsrapport och en miljökonsekvensbeskrivning att ingå. Den anläggningsutformning som ska ligga till grund för ansökan utgörs av resultatet av det ovan nämnda arbetet.

## 16 Alternativa metoder

I praktiken har vi i Sverige redan valt strategin 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 /16-1/. Resultatet av analysen ger ett starkt stöd för valet av huvudlinje (djupförvar enligt KBS-3-metoden). Samtidigt har dock SKB bestämt sig för att fortsätta följa och stödja utvecklingen av de två alternativen separation och transmutation samt deponering i djupa håll.

### 16.1 Separation och transmutation

Syftet med transmutation är att avsevärt minska den mängd av långlivade radionuklider som måste slutförvaras. Ett 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, dvs 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 t ex för elproduktion.

För att processen skall nå sitt syfte fordras att de långlivade ämnen som skall transmutteras skiljs från kvarvarande uran. I annat fall kommer det att bildas nya långlivade ämnen genom kärnreaktioner mellan uran och neutroner, dvs på samma sätt som transuranerna förut bildats (neutroninfångning) i de vanliga reaktorerna. För en lättvattenreaktor utgör uran cirka 95 procent av kvarvarande bränsle. Upparbetning (och separation av olika ämnen) är således en förutsättning för transmutation. Man talar därför ofta om separation och transmutation som ett begrepp eller vanligare på engelska – partitioning and transmutation.

#### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I samband med granskningen av FUD 98 efterlyste Kasam en sammanställning av arbetsläget inom separation och transmutation.

#### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

Utveckling av separation och transmutation innebär utveckling av ny kärnteknik och kräver betydande resurser och tid.

Fransmännen siktar i enlighet med en lag från 1991 mot ett etappmål 2006. Kostnaderna för programmet anges till 600 MUSD på 15 år /16-2/.

Japanerna har ej angivit något preciserat tidsschema för sitt program. Kostnaderna ligger i storleken tiotal MUSD per år /16-2/.

I USA presenterade DOE i slutet av 1999 en s k "roadmap" för utvecklingen av accelerator drivna system för transmutation (ATW) i en rapport till den amerikanska kongressen /16-3/. Denna studie bedömde att utvecklingen av ett system kan väntas ta cirka 30 år innan transmutation kan påbörjas i full skala i färdigutprovade anläggningar. Transmutation av allt kärnbränsle från nu existerande lättvattenreaktorer i USA skulle sedan i ett scenario ta cirka 90 år. Utvecklingskostnaderna bedöms till cirka 11 000 MUSD, investeringarna i transmutationsanläggningar till 50 000–60 000 MUSD och årliga driftkostnaderna till 500 MUSD.

Efter den nämnda studien har USDOE påbörjat ett program för utveckling av Advanced Accelerator Applications (AAA). Detta program har tre utvecklingslinjer:

- Accelerator driven transmutation, ATW.
- Fortsatt utveckling av ett reservalternativ för tritiumproduktion med hjälp av accelerator.
- Vetenskaplig och teknisk utveckling på acceleratorområdet.

Programmet har en budget för 2001 på 68 MUSD, varav cirka 25 procent uppges gå till ATW. Ett viktigt mål anges vara att bygga en accelerator driven testanläggning (ADTF) där man kan prova och demonstrera teknik som är relevant för transmutation och andra avancerade kärntekniska system. En sådan anläggning kan stå klar 2010. Programmet följer inte vare sig till kostnad, tid eller innehåll den väg som stakades ut i rapporten till kongressen. I stället synes man göra en bredare ansats och ta mer tid på sig för de grundläggande studierna.

### **Internationell utveckling**

En europeisk arbetsgrupp, med Carlo Rubbia som ordförande, presenterade i april 2001 en rapport /16-4/ där man förespråkar att en experimentanläggning med driftstart om tolv år byggs. Anläggningens storlek föreslås vara 100 MW termisk effekt. I EU:s femte ramprogram ingår designstudier av en sådan anläggning. Två varianter av den underkritiska reaktorn ska studeras; kylning med helium och kylning med flytande bly-vismut. Båda varianterna drivs med snabba neutroner från en spallationskälla med flytande bly-vismut. Källan drivs av en linjär accelerator som ger mer än 5 mA protoner med 600–1 000 MeV energi. I den första fasen är bränslet MOX med cirka 20 procent plutonium. Möjligheten finns att använda existerande obestrålad MOX från de utvecklade snabba reaktorerna SNR och Superphénix. Kostnaden för experimentanläggningen uppskattas till 1 200 MUSD fram till tidpunkten för drifttagning. Då ingår parallella utvecklingsarbeten på bränslesidan. Detta syftar till att man i en andra fas vill prova bränsle som är direkt avsett för transmutation av alla transuraner.

Inom EU:s forskningsprogram har insatserna på separation och transmutation ökat väsentligt under senare år. Under det tredje ramprogrammet 1989–1994 satsades 4,8 MEUR inom detta område och under det fjärde ramprogrammet 1994–1998 satsades 5,8 MEUR. Inom nuvarande femte ramprogram 1998–2002 budgeteras 26–27 MEUR för separation och transmutation. Starka krafter förespråkar en ytterligare ökning under det kommande sjätte ramprogrammet 2002–2006. Det finns emellertid även en icke obetydlig opinion bland forskare som är mot ökade insatser på transmutation. Skälen till detta är bl a höga kostnader, att tillgängligheten befaras bli låg på grund av den komplexa processen samt de delvis besvärliga strålskyddsproblemen.

De projekt som delfinansieras av EU täcker de väsentliga delarna av ett potentiellt system för separation och transmutation, dock utan att egentligen utgöra ett sammanhållet program för EU. Ett flertal av projekten domineras av de nationella insatserna, särskilt från fransk sida. Ett av dessa projekt är den ovan nämnda experimentanläggningen. Detta projekt koordineras av Framatome.

I Europa pågår även ett par projekt för byggande av spallationskällor dvs en av de vitala komponenterna i ett acceleratordrivet system. Vid PSI i Schweiz finns en sådan källa av fast material – wolfram, som byts varje år. I projektet MEGAPIE avser man att till år 2004 bygga en källa av flytande bly-vismut med avsevärt ökad effekt jämfört med den nuvarande. Detta projekt blir ett steg på vägen mot en källa med den styrka som krävs för ett system för transmutation. Deltagare i projektet är organisationer från Schweiz, Tyskland, Frankrike, Italien och Belgien.

I Belgien planerar man en acceleratordriven anläggning, MYRRHA, för forskning och isotopproduktion. Syftet är att ersätta den nuvarande forskningsreaktorn i Mol. Om denna kommer till stånd blir den ytterligare ett viktigt utvecklingssteg för spallationskällor.

Forskningsprogram med inriktning mot separation och transmutation finns även i framför allt Ryssland men även Tjeckien, Korea m fl länder.

### **Utveckling i Sverige**

Institutionen för kärnkemi vid Chalmers Tekniska Högskola (CTH) utvecklar nya vattenbaserade separationsprocesser. För att minska mängden avfall från framtida avancerade separationsprocesser innehåller extraktionsreagensen endast kol, väte, syre och kväve (CHON-principen). Detta gör att reagensen är fullständigt brännbara, vilket kan bidra till att minska det sekundära avfallet som är ett besvärligt problem vid separation. Resultaten finns publicerade i två vetenskapliga avhandlingar /16-5, 16-6/. Chalmers forskning om separation finns även redovisad i två årsrapporter för år 1999 respektive 2000 /16-7, 16-8/. På senare tid har en ny strategi utarbetats för att man på ett systematiskt sätt ska kunna undersöka den stora mängd tänkbara reagens som numera kan syntetiseras. Strategin bygger på teoretiska ansatser att systematisera extraktionsegenskaperna hos olika reagens samt ett litet antal stödjande experiment. På så sätt hoppas man på ett tidigt stadium kunna fokusera mot lovande reagenser och därmed undvika att göra ett stort antal dyrbara experiment på substanser som sedan visar sig vara ointressanta. Resultaten från dessa arbeten har varit framgångsrika. Den nya strategin kommer att tillämpas på studier av lämpliga reagens i det fortsatta utvecklingsarbetet.

Sedan maj 1996 deltar institutionen även i EU-programmet "Nuclear Energy – Fission" inom projekten NEWPART (1996–1999) och dess efterföljare PARTNEW (2000–2003). Förutom kärnkemi vid CTH i Sverige deltar även forskningsorganisationer från Frankrike, Italien, Spanien, Storbritannien och Tyskland i dessa EU-projekt. Institutionen har även mer informellt samarbete med LANL (USA) och JAERI (Japan).

Forskningen på transmutationsområdet vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm koncentreras i huvudsak till acceleratordrivna system (ADS). Forskningen vid institutionen för kärn- och reaktorfysik, som stöds av SKB (sedan 1993), fokuseras huvudsakligen på neutronik i acceleratordrivna system, utbränningsberäkningar, studier av spallationsprocessen (av central betydelse i acceleratordrivna system), studier av radio toxicitet i ämnen som bildas vid spallation, samt bränsle- och materialstudier.

På KTH har under de gångna åren avancerade verktyg för ADS utvecklats. Dessa inkluderar ett nytt datorprogram för utbränningsberäkningar och en kärndatabas för temperaturberoende simuleringar av ADS. KTH har också bidragit till en ny kärndatabas för neutronenergies upp till 150 MeV /16-9/.

Viktiga resultat av de senaste årens studier är:

- Plutonium och americium är de ämnen som är viktigast att transmutera om man vill reducera den långlivade radiotoxiciteten.
- Transmutation av plutonium i termiska neutronspektra ger inte någon signifikant minskning av radiotoxiciteten.
- Transmutation av plutonium i termiska neutronspektra ger stora problem med alfa- och neutronaktivitet från curium och Pu-238.
- Plutonium och americium bör därför transmuteras med snabba neutronspektra.
- Höga halter av americium ger starkt försämrade void- och temperaturkoefficienter. Accelerator drivna underkritiska system är därför lämpligare för transmutation av americium.
- Om man kan uppnå en utbränning på mer än 10 procent och minska sekundärförlusterna till cirka 0,1 procent kanske radiotoxiciteten på lång sikt kan minskas med en faktor 100, vilket brukar anges som mål.
- Vid återcyclus av plutonium och americium från lättvattenreaktorer i ADS får man problem med reaktivitetsförluster, vilket leder till minskad effekt hos systemet och minskad effektivitet i transmutationen. Ett förslag att kompensera detta är att använda brännbara absorbatörer /16-10/, ett annat är tätare intervall mellan bränslebytena /16-11, 16-12/.
- Kraftiga reaktivitetsändringar i ADS under utbränning kan leda till säkerhetsproblem om systemet utformas så att det är möjligt att variera protonströmmens styrka /16-13/.
- Om man använder bly-vismut som kylmedel blir voidkoefficienten bättre än med natrium /16-14/.

Det internationella samarbetet vid KTH är främst fokuserat på medverkan i några EU-projekt. Institutionen är koordinator för EU-projektet CONFIRM som avser konstruktion och tillverkning av uranfritt nitridbränsle samt bestrålning av detta i R2-reaktorn i Studsvik. Förutom KTH och Studsvik deltar CEA-Cadarache, Frankrike; BNFL och AEA, Storbritannien; Paul Scherrer Institute, Schweiz; samt Joint research center ITU, EU i detta projekt.

Institutionen medverkar vidare i de internationella projekten MUSE och SPIRE. Det första projektet omfattar underkritiska mätningar vid reaktorn Masurca i Cadarache, Frankrike. Inom projektet SPIRE studeras effekter av strålning på martensitiska stål. Man använder en blandad neutron- och protonstrålning.

KTH, i det här fallet avdelning för kärnkraftsäkerhet tillsammans med kärn- och reaktorfysik, medverkar dessutom i EU-projektet TECLA som studerar teknik, material, termohydraulik och säkerhetsfrågor för blylegeringar (smältor av bly och bly-vismut). Detta projekt delfinansieras dock icke av SKB.



Förutom EU-projekten är KTH också involverat i ett antal projekt som drivs inom ramen för ISTC (International Science and Technology Center). Detta centrum finansieras av EU, Japan och USA och har till uppgift att slussa in tidigare kärnvapenforskare i östra Europa på fredliga projekt. Ett antal av dessa projekt faller inom området acceleratordrivna system. Ett sådant är tillverkning av en spallationskälla av flytande bly-vismut vid Obninsk i Ryssland. Källan avses senare provas med bestrålning med protoner vid en lineär accelerator i Los Alamos i USA. Andra i sammanhanget intressanta ISTC-projekt är underkritiska experiment med termiska neutroner i Minsk i Vitryssland och med snabba neutroner i Dubna i Ryssland.

Verksamheten vid KTH finns sammanfattad i två årsrapporter till SKB /16-15, 16-16/.

Vid The Svedberg-laboratoriet (TSL) och institutionen för neutronfysik (INF) vid universitetet i Uppsala drivs ett projekt för mätning av tvärsnitt för neutroner i högenergiområdet 20 till 100 MeV. Detta används som underlag för att beräkna acceleratordrivna system. SKB stöder projektet tillsammans med SKI, Vattenfall AB och Barsebäck Kraft AB. Dessutom ger EU, FOI och Vetenskapsrådet stöd till samma eller närliggande verksamhet.

Projektet startade 1998 och sedan dess har verksamheten vuxit kraftigt i omfattning, främst genom att både projektstödet i sig och den verksamhet det finansierar har kunnat användas för att attrahera ytterligare resurser. Idag är fem doktorander och två disputeerade forskare verksamma i Uppsala inom eller nära projektet. Dessutom gör stora forskargrupper från Caen och Nantes (Frankrike) och Hannover (Tyskland) EU-finansierade experiment i Uppsala med den utrustning som utvecklats inom projektet. ISTC finansierar experiment i Uppsala för en forskargrupp från St Petersburg (Ryssland). En annan grupp från Moskva förbereder experiment.

Kärndataverksamheter vid höga energier koordineras i Europa av EU-projektet HINDAS, vilket omfattar 16 institut i sju länder. Uppsala intar en central plats med en representant i styrgruppen om tre personer.

Verksamheten har sedan 1999 resulterat i 26 publikationer i internationella tidskrifter eller proceedings från internationella konferenser. Dessutom har gruppen organiserat ett internationellt symposium och flera internationella möten. Vidare har en av doktoranderna inom projektet avlagt licentiatexamen och ISTC-samarbetet har resulterat i en doktorsavhandling.

Projektet har lett till att en liten forskargrupp inom grundläggande kärnfysik expanderat till den största inom kärnfysik, med ett tydligt fokus på energianknutna frågor. Detta har även gett spin-off-effekter. Nyligen har en nationell forskarskola inom kärnteknologi bildats med en forskare från INF som studierektor.

Fysik i allmänhet och kärnfysik i synnerhet har de senaste åren haft svårt att rekrytera doktorander. Detta gäller dock inte denna verksamhet där tillströmningen är god. För närvarande planeras en utveckling av verksamheten i riktning mot att förstå mekanismerna bakom strålskador, ett område som har stor relevans för all kärnenergi, men där förvånansvärt lite är känt.

Verksamheten vid TSL för 1999 och 2000 finns sammanfattad i en årsrapport till SKB /16-17/.

## **Forskningsprogram**

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 kärnbränsleavfallet 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 för närvarande 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 konstaterar vidare att flera grundläggande tekniska frågor måste ytterligare klargöras genom forskning innan större projekt kan definieras avseende acceleratordrivna system. Med hänsyn till utvecklingsläget, erforderliga resurser samt gällande energipolitiska beslut i Sverige bedömer SKB det inte rimligt att ta egna initiativ till större utvecklingsprojekt.

Under den närmaste treårsperioden avser SKB att bedriva inhemsk forskning vid universitet och högskolor i ungefär samma omfattning som nu. Syftet med forskningen ska i första hand vara att medverka till att grundläggande tekniska frågor kring separation och transmutation klarläggs. Inriktningen bör särskilt 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.

Internationellt råder en betydande enighet bland ansvariga organisationer och experter om att även en framgångsrik utveckling av separation och transmutation inte kommer att eliminera behovet av ett djupförvar. Däremot kan det förändra konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret och dess barriärer, samt kraftigt minska mängden av långlivade radionuklider som måste deponeras i djupförvaret.

De nationella och internationella programmen är bara i början av utvecklingen innan man kommer till de nödvändiga bekräftande storskaliga försöken. En framgångsrik utveckling och tillämpning av separation och transmutation kommer också att kräva en anpassning av hela kärnbränslecykeln med hänsyn till återvunnet uran. För att lyckas med utvecklingen kommer det att behövas ett omfattande internationellt samarbete. För svensk del kan sådant samarbete ske framför allt inom EU.

Förutsättningarna för en tillämpning av separation och transmutation är olika i skilda länder. De länder som idag upparbetar sitt bränsle – t ex Belgien, Frankrike, Japan, Schweiz, Storbritannien och Tyskland – har redan tagit det första nödvändiga steget att separera ut kvarvarande uran och plutonium. Andra länder som beslutat om direktdeponering t ex Finland, Spanien, Sverige och USA – måste överge denna linje. I detta sammanhang är det viktigt att notera att trenden idag är snarast den motsatta, dvs att länder överger upparbetning och i ökad omfattning lutar till direktdeponering. Ett aktuellt exempel är Tyskland. Utveckling och tillämpning av separation och transmutation är bl a med hänsyn till tid och kostnader avsevärt mer troligt i ett scenario med fortsatt användning, förnyelse och eventuell expansion av kärnenergi än i det motsatta fallet.

En viktig fråga som kräver ytterligare underlag och belysning är avvägningen mellan å ena sidan en ytterligare minskning av en relativt liten, kanske bara hypotetisk risk långt in i framtiden och å andra sidan en påtagligt ökad risk för exponering i nutiden eller i den nära framtiden på grund av starkt ökad hantering av kortlivade radioaktiva ämnen. En optimering av strålskyddet i detta perspektiv och i ICRP:s anda kommer sannolikt inte att tala för en långtgående separation och transmutation av alla långlivade ämnen.

## **16.2 Deponering i djupa borrhål**

Alternativet att slutförvara använt kärnbränsle i djupa borrhål utreddes i PASS-projektet /16-18/. Studien visade att kunskapen om djupa borrhål var mindre än för någon av de övriga geologiska metoderna som jämfördes. Resultaten från dels PASS-projektet och dels den sammanställning av geologiska förhållanden på stort djup som gjordes senare /16-19/ har legat till grund för en utredning om ett forsknings- och utvecklingsprogram för förvarskonceptet djupa borrhål /16-20/.

### ***Slutsatser i FUD 98 och dess granskning***

I samband med granskningen av FUD-program 98 framförde Kasam önskemål om en systemanalys samt en säkerhets- och funktionsanalys av slutförvaring i djupa borrhål. Kasam efterlyste även en redovisning av omfattningen och innehållet i det FUD-program som skulle behövas för kunna bedöma konceptet djupa borrhål på likvärdig grund som KBS-3. Man vill få en uppfattning av tid och resurser för detta.

### ***Nyvetenskap sedan FUD 98***

Konceptet djupa hål är med i den systemanalys som presenterades i oktober 2000 /16-1/.

Den utredning som vi har genomfört /16-20/ visar att det skulle ta cirka 30 år och kosta drygt 4 MSEK att höja kunskapen om konceptet till den nivå vi idag har för KBS-3-metoden. De geovetenskapliga insatserna är tidsstyrande för programmet. Utveckling av borrhåsteknik innehåller stora osäkerheter och skulle kunna förlänga totaltiden och öka kostnaden ytterligare.

De områden där behovet av forskning och teknikutveckling är störst gäller karakterisering av berggrunden, grundvattnets flöde och kemi, borrhningsteknik, kapselutformning, deponeringsteknik, buffertutformning och återtagbarhet.

Utredningen innehåller fem huvuddelar:

- Kunskapsläge och forskningsprogram för geovetenskap.
- Kunskapsläge, forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för teknikfrågor.
- Kunskapsläge och forskningsprogram för tekniska barriärer.
- Kunskapsläge och utvecklingsprogram för säkerhetsanalys.
- Tidsplaner och kostnader.

De geovetenskapliga frågeställningarna skulle kräva borrhning av pilothål till åtminstone fyra kilometers djup på tre utvalda platser. I dessa borrhål och på dessa platser skulle utrustning och metoder för mätning och undersökning utvecklas. Dessutom skulle ett aktivt deltagande i internationella djupborrningsprojekt vara nödvändigt.

För teknikutveckling och demonstration skulle en av platserna behöva väljas och ytterligare minst två djupa hål borraras. Dessa hål skulle rymma upp till full deponeringsdiameter (800 mm) och användas för utveckling av deponerings-, återtagningsteknik och utrustning.

De tekniska barriärerna och deras funktion är nära kopplad till analysen av den långsiktiga säkerheten. Höga hydrauliska tryck, mekaniska laster, temperatur och salthalt ställer annorlunda krav på de tekniska barriärerna än de som gäller ett KBS-3-förvar. Forsknings- och utvecklingsinsatser skulle krävas för design av kapsel och val av kapslingsmaterial samt val av buffert kring kapseln. Bränsleupplösning vid höga temperaturer och salthalter skulle kräva insatser för förbättrad analysteknik och kunskap om hur radionuklider förekommer i en sådan miljö.

Sammantaget finns det inget som idag talar för att ett förvar i djupa borrhål skulle öka säkerheten eller minska kostnaden för att slutförvara det använda kärnbränslet. SKB planerar därför inte att genomföra FUD-programmet för djupa borrhål utan koncentrera resurserna på att i en relativt nära framtid realisera ett förvar baserat på KBS-3-metoden.

SKB kommer även i fortsättningen att följa utvecklingen på området, eftersom de resultat och erfarenheter som inhämtas kan nyttiggöras även för förståelsen av förhållandena i ett KBS-3-förvar på cirka 500 meters djup.

## 17 Rivning

Innehavaren av kärnteknisk anläggning är skyldig se till att anläggningen dekontamineras och rivs i tillräcklig omfattning då den har tjänat ut. Några specifika föreskrifter som reglerar detta finns idag inte 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 studier för att säkerställa att teknik och kompetens finns och att kostnaderna bedöms på ett korrekt sätt. Kraftverken ansvarar för planering, tillstånd och genomförande av rivningen av sina egna anläggningar. Avfallets omhändertagande samordnas med SKB. SKB bevakar utvecklingen inom rivningsområdet i utlandet genom bl a deltagande i internationella organisationers rivningsstudier men också genom direktkontakt med olika rivningsprojekt som kan vara av värde för planeringen i Sverige.

Tidsplanen för rivning av kärnkraftverken är inte fastlagd. SKB:s planering är att kraftverken drivs i 40 år för att därefter rivs så snart som möjligt. Planeringen för byggande, drift och slutligen rivning av SKB:s anläggningar följer planeringen vid kärnkraftverken. Övriga anläggningar rivs så att de i tiden passar in i dessa planer. Rivningen av övriga anläggningar finansieras utanför finansieringslagen och arbetet med dessa anläggningar belastar inte Kärnavfallsfonden.

Kostnaden för att riva ett kärnkraftverk uppskattas grovt till 1 000 MSEK per block. Den totala rivningskostnaden bedöms hamna på cirka 20 000 MSEK inklusive omhändertagande av avfallet. Kostnaden uppdateras årligen bl a baserat på den kunskap och de erfarenheter som successivt erhålls.

### 17.1 Rivningsteknik

Erfarenheter från rivning av kärntekniska anläggningar har främst gjorts i utlandet men teknikstudier genomförs även i SKB:s regi. 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 man visat att det finns teknik för rivning och omhändertagande av avfallet från alla typer av kärntekniska anläggningar. Det återstår för SKB att förbättra och anpassa befintlig teknik för rivningen av de svenska kärnkraftverken.

De teknikstudier som SKB genomför /17-1/ avser att redovisa ett möjligt scenario för rivning av de svenska kärnkraftverken med utgångspunkt från befintlig teknik. 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 utan strålskydd kan användas för annan industriell verksamhet. Detta ska genomföras på ett sådant sätt att varken personalen som är sysselsatt med nedläggnings- och rivningsarbetet eller allmänheten utsätts för onödig bestrålning.

Projekteringen och tillståndsprocessen för slutförvaring av det radioaktiva avfallet från rivningen kräver en för landet gemensam planering. Planeringen ska ske i samarbete mellan kraftbolagen och SKB. Detta ger fördelar när det gäller tillgång till specialutrustning. Dessutom ger detta specialutbildad personal med möjlighet till erfarenhetsåterföring. Utgångspunkten för planeringen är att kraftverken drivs i cirka 40 år och att ingen rivning av ett block genomförs så länge drift pågår i ett närliggande block. Innan rivningen påbörjas ska ett slutförvar för omhändertagande av det kortlivade rivningsavfallet stå färdigt och kapacitet ska finnas för att mellanlagra det långlivade avfallet. Sammantaget innebär detta att den första rivningen påbörjas någon gång efter år 2015. Ett förslag till logistik för rivning redovisas /17-2/.

Det är kraftföretagen som har huvudansvaret för planeringen och genomförandet 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. Kraftbolagen kan i detta arbete använda SKB som en resurs. Kraftföretagen har huvudansvaret för behandling av det radioaktiva avfallet, men omhändertagandet 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 ett slutförvar byggas. Det kortlivade rivningsavfallet planeras bli deponerat i en utbyggnad av SFR. Det avfall som suttit nära reaktorhärden är kraftigt neutronbestrålat och betraktas som långlivat. Detta avfall ska först mellanlagras innan det slutdeponeras i ett förvar liknande SFR men på större djup. Det kan byggas i anslutning till SFR eller djupförvaret för använt bränsle. I figur 17-1 finns en översiktlig tidsplan för rivning och omhändertagande av det radioaktiva låg- och medelaktiva avfallet.



## 17.2 Rivningslogik

De svenska kärnkraftverken är tagna i drift under en relativt kort period (1972–1985). Med antagande att livslängden för de olika kraftverken är lika lång kommer avställning att ske under en 13-års period. Ett undantag från detta är stängningen av Barsebäck 1, som genomfördes 1999 trots att en betydande del av den tekniska livslängden på anläggningen återstod. Den tekniska livslängden hos ett kärnkraftverk bedöms generellt till 40 år. Genom olika åtgärder bör det vara möjligt att förlänga denna tid avsevärt men i de logistikstudier för rivning som SKB genomför antas endast 40 års livslängd.

När ska rivningen av ett avställt kärnkraftblock genomföras? Internationell erfarenhet visar på en uppsjö av varianter – allt från omedelbar 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.

Rivning antas ske efter en relativt grundlig dekontaminering av anläggningens processsystem. Detta görs för att reducera stråldosen 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 det tar minst tre år. Därefter sker rivning av de konventionella inaktiva systemen och byggnaderna. Detta beräknas ta cirka två år. Därefter återställs anläggningsplatsen till industriområde för annan verksamhet. En total rivningstid på cirka sex år samt ett till två år för borttransport av det använda bränslet bedöms vara kortast möjliga avvecklingsperiod.

## 17.3 Avfallshantering och deponering

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 dekontaminering 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. Idag 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 utförsel från kärnkraftverken.

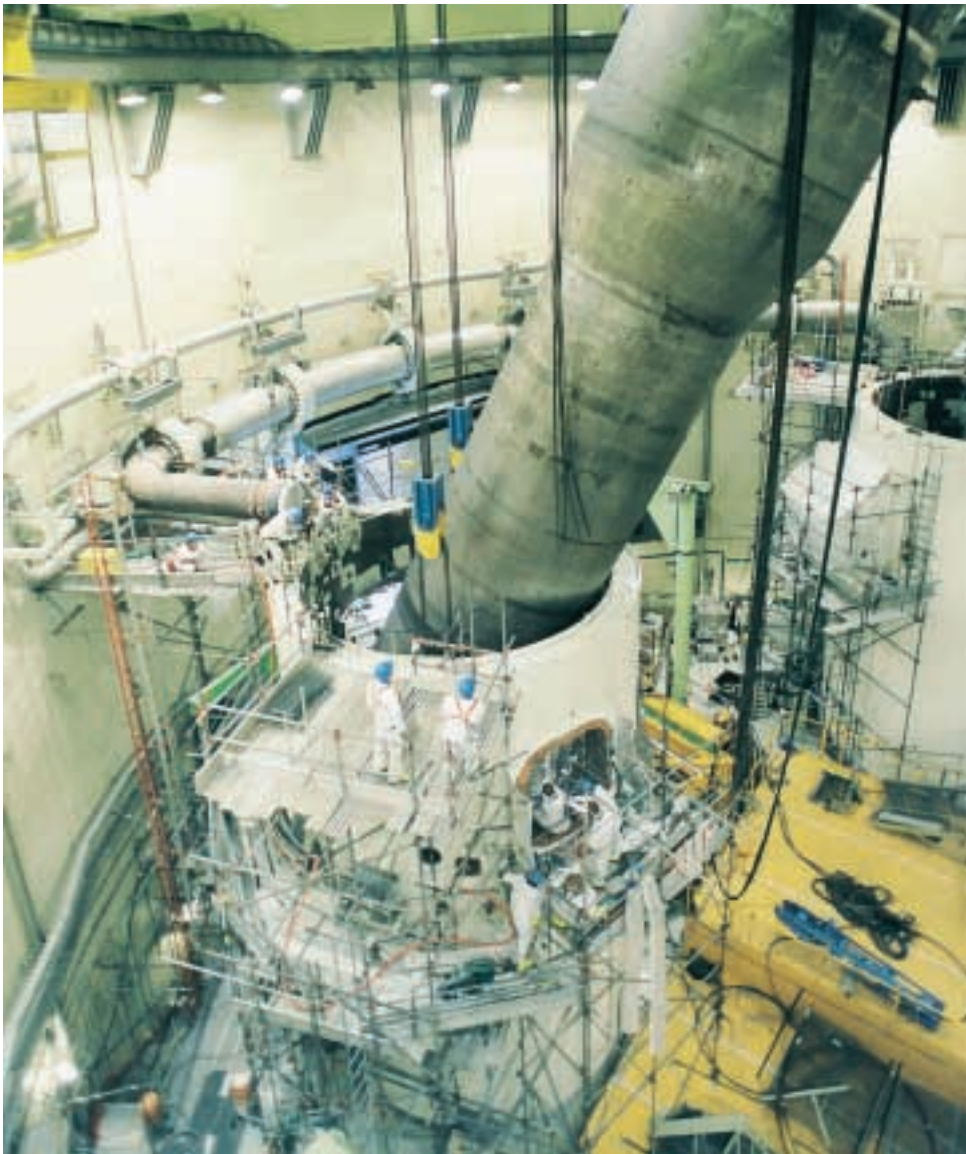
Det avfall som inte friklassas ska tas omhand i SKB:s anläggningar. Det kortlivade rivningsavfallet planeras bli deponerat i en utbyggnad av SFR. Denna anläggningsutbyggnad ska genomföras så att den första etappen står färdig när rivning av kraftverken börjar. Enligt nuvarande planer ska ett slutförvar för det kortlivade avfallet vara klart till cirka 2015.

Det långlivade avfallet från rivningen består främst av de interna reaktordelar som under drift utsatts för betydande neutronbestrålning. Dessa utgör en liten volym (förpackat mindre än 1 000 m<sup>3</sup> för ett kraftverk) men behöver tas omhand separat. De är dels kraftigt strålning 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 till dess att merparten av alla kraftverk har rivits. Därefter deponeras avfallet i ett särskilt förvar, som byggs t ex 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 slutligen deponeras.



## 17.4 Kunskapsläget

Runt om i världen pågår rivning av större och mindre kärntekniska anläggningar. En hel del rivningsprojekt har fullbordats och många pågår och planeras. I Sverige finns erfarenhet av rivning av mindre forskningsreaktorer, R1 i Stockholm och några mindre anläggningar i Studsvik. I Studsvik pågår sanering för friklassning och rivning av det aktiva centrallaboratoriet ACL. Eftersom försök med alfastrålande material förekommit i ACL får vi här erfarenhet av dekontaminering och rivning av denna typ av anläggning. Större ombyggnader och modifieringar på kärnkraftverken har genomförts och kommer att genomföras, se figur 17-2. Genom dessa projekt får vi värdefull kunskap inför den framtida rivningen.



*Figur 17-2. Byte av ånggenerator vid Ringhals.*

### 17.4.1 IAEA

Inom IAEA har avvecklingsfrågor funnits med sedan början av 1970-talet. Som separat program sedan 1985. Ett flertal dokument av värde för planeringen av rivning och slutförvaring av rivningsavfall finns idag tillgängliga. Allmänt vedertagen är IAEA:s definitioner för olika nivåer för avvecklingen:

- Nivå 1** Använt bränsle bortforslat, systemen tömda på vatten och manöversystemen bortkopplade. Tillträde till anläggningen begränsas och anläggningen övervakas och inspekteras periodiskt.
- Nivå 2** Huvuddelen av de komponenter som innehåller radioaktiva ämnen har samlats i ett begränsat utrymme, t ex reaktorbyggnaden. Utrymmet försluts varvid behovet av övervakning minskar. Utrymmen och byggnader utanför denna inneslutning friklassas. Området kan användas för annan verksamhet med eller utan rivning av byggnader.
- Nivå 3** Allt radioaktivt material har avlägsnats och området har friklassats. Friklassade utrymmen rivs eller utnyttjas för annan verksamhet. På denna nivå finns även möjlighet att anordna begränsad förvaring av radioaktivt material inom området med övervakning under några tiotals år.

Nationella varianter av dessa definitioner förekommer. Övervakningsperioden i nivå 1 och 2 varierar, alltifrån några få år i nivå 1 till cirka 100 år i nivå 2 innan den slutliga rivningen sker. Skälen till senareläggning av rivningen är flera; förvaringsmöjligheten för rivningsavfall kan vara begränsat, man kan vilja avvakta viss avklingning av radioaktiviteten eller så saknas pengar eller andra resurser för rivningen.

### 17.4.2 OECD/NEA

Sedan 15 år finns ett samarbetsprogram inom OECD/NEA för utbyte av vetenskaplig och teknisk information mellan pågående rivningsprojekt. Idag ingår cirka 30 projekt, bland annat rivningen av ACL i Studsvik. Ett antal grupper har inom programmets ram arbetat och arbetar med återanvändning av material, rivningskostnader och dekontaminerings teknik. Syftet med dessa gruppers arbete är att sammanställa erfarenheter och ge rekommendationer.

För framtiden inriktas arbetet på att uppnå mer standardiserade processer för rivning och mot mer generella frågeställningar som nationella och internationella regler, riktlinjer och standarder.

### 17.4.3 EU

Historiskt har inom EU ett antal forskningsprojekt inom rivningsområdet förekommit. Idag gör EU liksom IAEA och OECD/NEA bedömningen att tekniker för rivning av kärntekniska anläggningar är väl utvecklade och att det är tillämpningen som idag kan förfinas och göras mer effektiv. Forskningen är idag ganska blygsam men det finns några rivningsprojekt som bedrivs inom EU som kan vara av särskilt intresse för oss i Sverige:

- KRB-A BWR (Kokarreaktor i Gundremmingen, Tyskland).
- BR-3 PWR (Tryckvattenreaktor Mol, Belgien).

Inom det femte programmet har EU beslutat stödja ett nätverk med organisationer involverade i utveckling av kärntekniska anläggningar. Målsättningen med nätverket är att utbyta erfarenheter mellan deltagande organisationer. Vidare är det tänkt att nätverket ska sprida erfarenhet och resultat från de forskningsprojekt inom rivningsområdet som drivs i EU:s regi.

#### **17.4.4 Utvecklingsprogram**

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.
- Genom kostnadsberäkningar ge underlag för behov av fondering av 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. Idag finns möjlighet till detta i CLAB men en utbyggnad av CLAB krävs om allt långlivat rivningsavfall ska mellanlagras där. SKB kommer därför att studera alternativa mellanlagringsalternativ.

För den kommande sexårsperioden kommer den huvudsakliga inriktningen att vara:

- Utveckling av metod för torr mellanlagring av hårdkomponenter och vissa interna delar som alternativ till lagring i CLAB.
- Upprättande av ett lättillgängligt register över dokumentation inom rivningsområdet.
- Införande av system för registrering av avfall avsett för slutförvaring i framtida förvar (SFR 3, slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall).
- Uppskattning av persondoser vid rivning av kärnkraftverk.
- Omhändertagande av inaktivt avfall (mängder, förvaring, återanvändning).
- Översyn av rivningslogistiken.
- Preliminära säkerhetsanalyser för slutförvar för kortlivat avfall (samordning av SFR 1 och SFR 3).



## 18 Annat långlivat avfall

Låg- och medelaktivt avfall från forskning, industri och medicin packas och mellanlagras i ett särskilt bergrum i Studsvik. Det mesta av det låg- och medelaktiva avfallet går till SFR för slutförvaring på samma sätt som driftavfall från kärnkraftverken. En del av avfallet i Studsvik innehåller dock för mycket långlivade radionuklider för att det ska kunna tas emot vid SFR, såsom anläggningen är utformad idag. Sådant avfall mellanlagras tills vidare på Studsvik.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer även från kärnkraftverken. Detta utgörs av förbrukade interna delar från reaktorerna, inklusive härdkomponenter. De lagras idag i CLAB eller vid kärnkraftverken. I samband med att kraftverken rivs i större omfattning kommer ett gemensamt mellanlager att behöva erbjudas som alternativ till CLAB. Om allt långlivat rivningsavfall ska till CLAB måste ytterligare en bassäng byggas. Konditionering och slutförvaring av interna delar behöver inte påbörjas förrän tidigast omkring år 2045. Bygger SKB slutförvaret tidigare måste det hållas öppet under en längre tid vilket bl a har den nackdelen att det blir dyrare än att mellanlagra under denna period.

Lokalisering av ett förvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall är därmed en fråga som inte blir aktuell förrän omkring år 2035. Ett slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall kan då byggas i anslutning till SFR eller djupförvaret.

En preliminär utformning av detta förvar har studerats och en säkerhetsanalys har genomförts /18-1/. Under kommande år fortsätter arbetet med att utforma kollin och att utveckla metoder för att hantera avfallet. I anslutning till detta förbereder vi framtida utformning av förvaret och säkerhetsanalyser genom forskning och utveckling.

### 18.1 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 Studsvik i kokiller eller fat för att sedan deponeras. Materialet från kärnkraftverken mellanlagras idag i sk skrotkassetter 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 (SFL 3-5) som genomfördes året därpå /18-1/. Den totala volymen av långlivat låg- och medelaktivt avfall från Studsvik uppskattades till 1 850 m<sup>3</sup>. Härdkomponenter och interna delar från kärnkraftverken beräknades till totalt 7 800 m<sup>3</sup> för BWR och

1 800 m<sup>3</sup> för PWR (volymerna är beräknade från yttermått på de avfallskollin som antingen redan finns eller kommer att produceras).

Ett system för dokumentation av det långlivade avfallet håller på att utvecklas av SKB. Systemet kommer att likna det för SFR-avfall, men dessutom kommer dokumentationen att ske 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 98 och dess granskning**

SKI framhöll i granskningen av FUD-program 98 betydelsen av att SKB karakteriserar osäkerheterna i avfallets inventarium av radionuklider.

### **Nyvännen kunskap sedan FUD 98**

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.

## **18.2 Förvaret**

En ny layout togs fram 1996 inför den preliminära säkerhetsanalysen av ett förvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall som rapporterades i december 1999 /18-1/. Förslaget till konstruktion byggde i allt väsentligt på erfarenheterna från bergsalen BMA, som är en del av slutförvaret SFR-1 för kärnkraftens driftavfall. BMA har varit i drift sedan 1988 och dessförinnan varit föremål för en grundlig säkerhetsanalys. Två sådana berggrum skulle behövas för att rymma det långlivade avfallet som i så fall placeras i inbyggnader av betong på liknande sätt som i BMA. En viktig skillnad är dock att bergsalarna för långlivat avfall skulle placeras betydligt djupare, åtminstone 300 meter under markytan. På så vis skulle berget utnyttjas bättre som barriär och skydda det långlivade avfallet mot påverkan utifrån, samt förhindra spridning av radionuklider.

Genom att lägga inbyggnaderna av betong på packat grus och till sist återfylla bergsalarna med krossat berg åstadkommer man med tiden en sk hydraulisk bur. När förvaret förslutits och grundvattnet fyllt upp alla tomma utrymmen uppstår den hydrauliska buren. Vatten leds då förbi inbyggnaderna med avfallet, istället för genom dem. Detta beror på att inbyggnaderna av betong är mycket tätare än återfyllnaden av grus; betongen har en lägre hydraulisk konduktivitet.

Även inbyggnaderna ska vara återfyllda efter slutförd deponering, men med betong. Därigenom står inbyggnaderna bättre emot yttre mekaniskt tryck. Det är dock viktigt att gas, som kanske bildas i en del av avfallet, lätt kan tränga ut från inbyggnaderna. Därför ska återfyllnadsbetongen vara porös. Det är en liknande lösning som den för silon i SFR 1. Där används regelbundet en speciell porösbetong för kringgjutning. Vi har föreslagit att samma porösbetong används även här. Gas som bildas kan då stiga upp genom den porösa betongen och nå sprickor i berget via återfyllnaden av grus. Härigenom undviker man att gas samlas och bildar gasfyllda fickor som kan förtränga kontaminerat vatten.

I utkastet till djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall ingick även att utnyttja en del av transporttunnlarna för deponering. Där kunde en del lågaktivt avfall placeras – speciellt sådant som uppstår sent, t ex en del rivningsavfall från CLAB.

## **Slutsatser i FUD 98 och dess granskning**

I FUD-program 98 redovisades den nya layouten från 1996. Vid granskningen framförde SKI önskemål om tydligare motivering till de förändringarna i layout som gjordes 1996.

### **Nyvetenskap sedan FUD 98**

Förändringarna i layout var främst motiverade utifrån rent praktiska hänsyn och inte minst de goda erfarenheterna från bygge, drift och säkerhetsanalys av BMA i SFR 1. Vi ville dessutom förenkla förvaret genom att ha så få komponenter som möjligt och därigenom underlätta analysen av den långsiktiga säkerheten. Att eliminera bentonit, som fanns med i föregående layout, var ett steg i den riktningen. En tredje anledning var önskemålet att gas lättare skulle kunna lämna inbyggnaderna /18-2/. Metaller i avfallet och stålarmeringen i betongen kan ge upphov till gas vid korrosion.

## **18.3 Säkerhetsanalysen**

En preliminär säkerhetsanalys har genomförts av slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall /18-1/. Målet var dels att utvärdera den nya designen och dels att se vilken betydelse som förvarsplatsens egenskaper har för säkerheten på lång sikt. "Preliminär" i det här sammanhanget innebar att alla aspekter inte analyserades. Detta gäller till exempel scenariot med en ny istid. Den preliminära säkerhetsanalysen var ett tidigt steg i riktningen mot ett sådant här förvar och resultaten från analysen ska vägleda den fortsatta utvecklingen.

Inom ramen för den preliminära säkerhetsanalysen beräknade vi den potentiella spridningen och påverkan på omgivningen från radionukliderna i avfallet. Även miljöfarliga ämnen i avfallet, såsom bly, beryllium och kadmium togs med i beräkningarna.

Analyserna utgick från samma hypotetiska förvarsplatser som i SR 97, dvs Aberg (Äspö), Beberg (Finnsjön) och Ceberg (Gideå) /18-3/. Därigenom kunde vi utnyttja en del av det omfattande material som togs fram för SR 97. De tre platserna hade olika hydrauliska egenskaper. Detta gjorde det möjligt att se betydelsen av platsval för den här typen av förvar. Till exempel så kunde (representativa) vattenflödet i Beberg antas vara 1 liter/m<sup>2</sup> år, i Aberg en faktor tio högre och i Ceberg en faktor tio lägre. Detta gav för Beberg ett (specifikt) vattenflöde på 0,01 liter/m<sup>2</sup> år i inbyggnaderna av betong och cirka 30 liter/m<sup>2</sup> år i grusfyllningen. För ett förvar i Aberg blev motsvarande flöden tio gånger högre och i Ceberg tio gånger lägre.

Genom valet av Aberg, Beberg och Ceberg kunde vi även belysa betydelsen av utsläpp i olika typer av områden i biosfären. Flödesvägarna från förvaret mynnar ut i vad som klassificeras som "skärgård" respektive "kust" i Aberg, "jordbruksmark" i Beberg och "torvmark" i Ceberg.

Ett referensscenario valdes där grundvatten tränger in i förvaret efter förslutning, men där förhållandena i övrigt förblir oförändrade. Vi studerade även andra scenarior. Klimatförändringar, seismisk aktivitet och mänskliga handlingar är exempel på sådant som skulle kunna påverka förvarets framtida funktion. Påverkan på omgivningen har emellertid endast beräknats för referensscenariot samt för scenariot med en framtida borrhål i närheten av förvaret.

## **Slutsatser i den preliminära säkerhetsanalysen och dess granskning**

De huvudsakliga slutsatserna från den genomförda studien är följande:

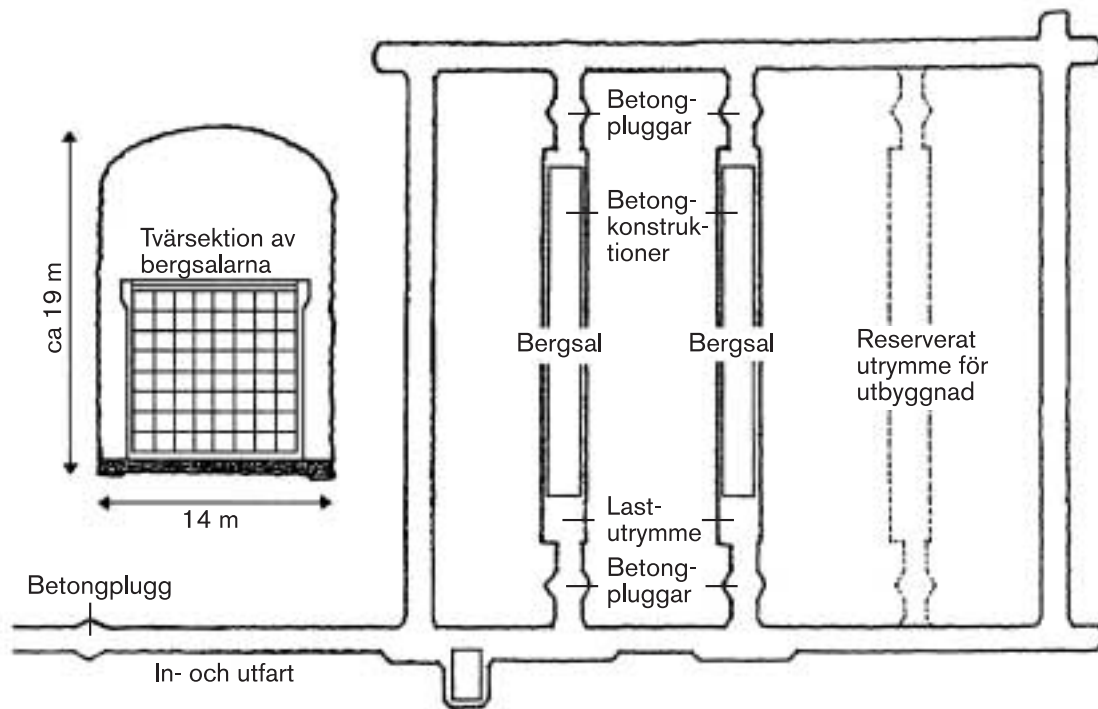
- De radionuklider i avfallet som är av störst betydelse för att kunna avgöra säkerheten är de som är mycket rörliga och har lång livslängd. Den långa livslängden innebär att barriärerna och ekosystemen måste betraktas i ett mycket långt tidsperspektiv.
- För att minska osäkerheten i beräknad omgivningspåverkan bör vi koncentrera oss på att minska osäkerheter i uppskattningarna av de dosdominanta radionukliderna Cl-36 och Mo-93. Även utredningar som leder till ökad förståelse av deras tillgänglighet i avfallet, migration i barriärerna och dospåverkan är av betydelse.
- Platsens egenskaper är av betydelse för säkerheten. Två saker framstår som speciellt viktiga: vattenflödet på det djup i berget där förvaret förläggs och ekosystemet i de områden på markytan där utsläpp kan ske i framtiden.
- Ett ogynnsamt högt vattenflöde i berget omkring förvaret kan kompenseras med bättre barriärer i närområdet. Funktionen måste dock bibehållas under mycket lång tid. Det kräver material som är beständiga i förvarets kemiska och mekaniska miljö.

Den preliminära säkerhetsanalysen har granskats ingående av SKI och SSI med hjälp från en grupp av internationella experter. Slutsatserna av såväl expertgruppens som myndigheternas granskning har rapporterats /18-4, 18-5/. Både myndigheterna och expertgruppen drar slutsatsen att "det återstår mycket utvecklingsarbete innan kunskapsnivån inom området blir jämförbar med den nuvarande för slutförvaret för använt bränsle". Det räcker inte, anser myndigheterna, att referera till kunskapen om SFR eftersom "tidsperspektivet medför att kunskapskraven för att kunna genomföra trovärdiga bedömningar av till exempel tekniska barriärer och plats specifika förhållanden blir högre (för förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall)".

SKI och SSI noterar att SKB:s planer 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.

Beträffande nya säkerhetsanalyser anser myndigheterna att: "Efter genomförandet av platsundersökningarna borde tiden vara mogen för att ta fram en mer omfattande säkerhetsanalys (för förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall)." SKB instämmer i detta. Efter platsundersökningarna finns tid och underlag för en säkerhetsanalys och inte minst har vi kunskap om berget som barriär. Det senare är av stor betydelse för den här typen av djupförvar. Att undersökningarna är inriktade på förvaret för använt bränsle saknar större betydelse eftersom det i princip är samma typ av platsdata som behövs. Den exakta tidpunkten för säkerhetsanalysen väljs med hänsyn till övriga säkerhetsanalyser och resurser, se figur 18-1.





*Figur 18-1. Plan över djupförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall /18-1/.*

## 18.4 Forskningen

### 18.4.1 Inriktning på långsiktig säkerhet

De undersökningar som görs syftar främst till att ta fram data och modeller för att analysera den långsiktiga säkerheten. Referensscenariot i den preliminära säkerhetsanalysen bygger i allt väsentligt på vår samlade kunskap på det området. Kunskapen har byggts upp dels genom den forskning som SKB understött och dels genom att vi tagit del av internationella utredningar på området. Vi har funnit att bland de viktigaste processerna, som kan påverka barriärernas långtidsegenskaper, finns följande:

- Korrosion av stål och aluminium (bildning av gas och korrosionsprodukter).
- Mikrobiell nedbrytning av organiskt material i avfallet.
- Uppbyggnad av gasöverttryck i avfallskollin och inbyggnad av betong.
- Lakning av cement och betong (högt pH).
- Reaktionen mellan lakningsprodukter från cement och omgivande grusfyllning.
- Utfällning av kalcit och brucit (dvs kalciumkarbonat och magnesiumhydroxid).
- Alkalisk nedbrytning av cellulosa i avfallet (bildning av komplexbildare).

Interna metalldelar från reaktorerna är en väsentlig del av avfallet. En del radionuklider finns i CRUD på ytan av kontaminerade metalldelar. Större delen av aktiviteten härrör dock från inducerad aktivitet. Då måste metallen först korrodera för att radionukliderna ska bli tillgängliga. 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.

## **18.4.2 Nyvunnen kunskap sedan FUD 98**

### ***Kolonnförsöken på BGS***

För att pröva hur berg (inklusive återfyllnadsgrus och ballast) påverkas av cementporvatten har British Geological Survey, BGS, i Storbritannien genomfört laboratorieexperiment där cementporvatten pumpades genom kolonner med krossat mineral. Detta internationella projekt är nu avslutat. Experimenten visade att bergets mineral reagerar med cementporvatten och bl a bildas kalciumsilikahydrater. De sekundära produkterna tenderade att sätta igen kolonnerna. Tendensen i vattenförande sprickor i berget blir sannolikt densamma, dvs igensättning med tiden.

### ***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 med stöd av SKB undersökts ingående i ett doktorsarbete vid Linköpings Universitet /18-6/. ISA bildas i högt utbyte (70–85 procent), men reaktionen stannar av när cirka 20 procent av cellulosan brutits ned. Det senare behöver undersökas närmare.

### ***Diffusion av radionuklider och ISA i betong***

Betongen utgör en väsentlig 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 som sorberas i betongen hålls kvar. Sorption och diffusion av radionuklider i betong har studerats i ett doktorsarbete vid Chalmers Tekniska Högskola /18-7/. SKB har även låtit forskare vid Chalmers Tekniska Högskola och Linköpings Universitet undersöka inverkan av ISA på diffusion av radionuklider i betong. En viktig observation är att ISA själv sorberas kraftigt i betong vilket mildrar den effekt komplexbildning med ISA kan ha på radionuklidernas rörlighet. Resultaten tyder på att även komplexen sorberas.

### ***Gammal betong***

Avfallet kommer till stor del att vara inneslutet i behållare av betong och inbyggnaden med dess återfyllning består också av betong. Betongen är en väsentlig barriär i närområdet. Även om vi inte tror att betongen kan förhindra inträngning av grundvatten 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 betongen inte förändras alltför mycket med tiden. Att det skulle uppstå en del nya sprickor 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.

Vatten i kontakt med betong kan lösa upp en del av de komponenter som ingår i betongen. Det skulle på lång sikt kunna medföra försämringar. Modeller finns med vars hjälp man kan beräkna utlakningen av betong. 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 /18-8/. Inget av proverna är visserligen äldre än 90 år, men med mikroskopiska undersökningar kan man ändå följa förändringarna. Resultaten har använts i den preliminära säkerhetsanalysen.

### **Cementanalogi**

I Projekt Maqarin undersöks hyperalkaliska vatten (pH cirka 12) samt primära och sekundära cementmineral som finns naturligt i vissa områden i Jordanien, se figur 18-2. 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 /18-9/. Resultaten från projektet har använts i den preliminära säkerhetsanalysen, till exempel följande slutsatser:

- 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).



*Figur 18-2. Provtagning av kolloider under jord i Maqarin, Jordanien.*

- 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.

### ***Experiment in situ***

Kolonnförsöken som BGS utfört 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 detta kommer att fungera i en verklig förvarsmiljö och hur det kommer att 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 kommer att injiceras i sprickor i berget tillsammans med upplösta radionuklider. Sprickorna kommer att borrar ut och undersökas efteråt. Projektet leds av Nagra. Det startade 1997 och ska pågå till 2002. Försöket förbereds med laboratorieexperiment och beräkningar. 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.

### **18.4.3 Utvecklingsprogram**

De övergripande målen för tiden 2002–2007 är att:

- Förbereda framtida säkerhetsanalyser.
- Utveckla hantering och lagring av avfallet.

Erfarenheterna från den preliminära säkerhetsanalysen har gett oss värdefull vägledning för 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 visat 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 avfallets sammansättning, innehåll och egenskaper håller på att tas fram på SKB. Dokumentationen kommer att ske på liknande sätt som för övrigt låg- och medelaktivt avfall.

Forskning om processer i förvaret är också 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. Hit hör följande:

- Egenskaper hos grundvatten och betong i förvaret.
- Diffusion och sorption av radionuklider i betong och berg vid höga pH.
- Inverkan av organiska ämnen (speciellt cellulosa).
- Korrosion av metaller i betong.

I expertgruppens kommentarer till den preliminära säkerhetsanalysen framhålls betydelsen av betongen /18-4/. En av deras synpunkter är att vi speciellt bör pröva inverkan av salt grundvatten på betong.

I den preliminära säkerhetsanalysen använde vi ungefär samma modell som i SR 97 för att beräkna transport av radionuklider i närområdet. Men en mer anpassad beräkningsmodell för låg- och medelaktivt avfall hade antagligen varit bättre. Vi ska undersöka vilka modeller som kan finnas.

Metoder för hantering och lagring av avfallet utvecklas tillsammans med kärnkraftverken.

Förvarets storlek och utformning blir i viss mån beroende på dess lokalisering. Vid placering i anslutning till SFR kan man förvänta sig att SFR står öppet ända tills att slutförvaret för långlivat avfall ska stängas. I det läget kommer allt kortlivat avfall som uppkommer sent att placeras i SFR. Förvaret för långlivat avfall kan då göras mindre.



# Referenser

## Kapitel 1

- 1-1 **SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I–IV. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB
- 1-2 **SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-3 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-4 **SKB, 2000.** Systemanalys – Omhändertagande av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. SKB R-00-29, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-5 **SKB, 1995.** Förstudie Storuman. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-6 **SKB, 1996.** Förstudie Malå. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-7 **SKB, 2000.** Förstudie i Östhammar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-8 **SKB, 2000.** Förstudie i Nyköping. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-9 **SKB, 2000.** Förstudie i Oskarshamn. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-10 **SKB, 2000.** Förstudie i Tierp. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-11 **SKB, 2000.** Förstudie i Hultsfred. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-12 **SKB, 2000.** Förstudie i Älvkarleby. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-13 **Leijon B, 1998.** Nord-syd/Kust-inland. Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige. SKB R-98-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-14 **SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-15 **Havel R, 2000.** FRINK Projektrapport – Inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret. SKB R-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 1-16 **Saksa P, Numela J, 1998.** Geological-structural models used in SR 97. Uncertainty analysis. SKB TR-98-12, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 2

- 2-1 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport, Del I och II.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 2-2 **SKI/SSI, 2000.** SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SKB:s Säkerhetsrapport 97, Granskningsrapport.  
SKI rapport 00:39, Statens kärnkraftinspektion  
SSI-rapport 2000:17, Statens strålskyddsinstitut
- 2-3 **SKI, 2000.** Internationell fristående expertgranskning av Säkerhetsrapport 97: Säkerhet efter förslutning av ett djupförvar för använt kärnbränsle i Sverige.  
SKI rapport 00:45, Statens kärnkraftinspektion
- 2-4 **SSI FS 1998:1.** Statens strålskyddsinstituts föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall.
- 2-5 **SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall.  
Preliminär säkerhetsanalys.  
SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 2-6 **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
- 2-7 **SKB, 2001.** Slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR 1. Slutlig säkerhetsrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 2-8 **SKB, 1999.** SR 97 – Processer i förvarets utveckling. Underlagsrapport till SR 97.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 2-9 **NEA 2001, 2001.** Scenario development methods and practice, an evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, May 2001.
- 2-10 **Hedin A, 2001.** Integrated analytic radionuclide transport model for a KBS-3 repository. Submitted to Nuclear Technology 2001
- 2-11 **Lindgren M, Lindström F, 1999.** SR 97 – Radionuclide transport calculations  
SKB TR-99-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 2-12 **Hedin A, 2001.** Very fast probabilistic dose calculations and uncertainty analyses. Proceedings from the third international symposium on Sensitivity Analysis of Model Output, SAMO
- 2-13 **Saltelli A, Andres T H, Homma T, 1993.** Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques. Comput Statist Data Anal 15, pp 211–238

## Kapitel 4

- 4-1 **SKB, 2000.** Plan 2000. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-2 **Forsyth R, 1995.** Spent nuclear fuel. A review of properties of possible relevance to corrosion processes.  
SKB TR 95-23, Svensk Kärnbränslehantering AB



- 4-3 **Baudoin P, Gay D, Certes C, Serres C, Alonso J, Luhrmann L, Martens K H, Dodd D, Marivoet J, Vieno T, 2000.** Spent fuel disposal performance assessment (SPA project). European Commission, EUR 19132 EN
- 4-4 **Spahiu K, Werme L, Eklund U-B, 2000.** The influence of near field hydrogen on actinide solubilities and spent fuel leaching. *Radiochim Acta* 88, 507–511
- 4-5 **Cui D, Eriksen T, Eklund U-B, 2001.** On metal aggregates in spent fuel: Synthesis and leaching of a Mo-Ru-Pd- Rh alloy. Accepted for publication in *Scientific Basis for Radioactive Management*. Material Research Society Symposium Proceedings (K. Hart editor), Sydney
- 4-6 **Agrenius L, 2000.** Comparison of results from criticality safety calculations of storage canisters. SKB PM TI-00-07, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-7 **Röllin S, 1999.** On-line coupling of an ion chromatograph to the ICP-MS: Separations with a cation exchange chromatography column. SKB TR-99-35, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-8 **Röllin S, Eklund U-B, 2000.** Determination of U(IV) and U(VI) by ion chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry and its application to kinetic studies. *Journal of Chromatography A*, 884, pp 131–141
- 4-9 **Röllin S, Spahiu K, Eklund U-B, 2001.** Separation of actinide redox species with cation exchange chromatography and its application to the speciation of Pu. Accepted for publication in *Radiochimica Acta*
- 4-10 **Spahiu K, Werme L, Low J, Eklund U-B, 2000.** In-situ long term  $E_h$  and pH measurements during stationary spent fuel leaching. *Sci. Basis for Nuc. Waste Management XXIII*, ed. by R W Smith and D W Shoosmith, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 608, pp 55–60
- 4-11 **Bruno J, Cera E, Eklund U-B, Eriksen T, Grive M, Spahiu K, 2000.** Experimental determination and chemical modelling of radiolytic processes at the spent fuel/water interface. *Radiochimica Acta*, 88, pp 513–519
- 4-12 **Eriksen T E, Eklund U-B, Werme L, Bruno J, 1995.** Dissolution of irradiated fuel: a radiolytic mass balance study. *J Nucl Mater*, 227, pp 76–82
- 4-13 **Ramebäck H, Albinsson Y, Skålberg M, Eklund U-B, Kjellberg L, Werme L, 2000.** Transport and leaching of technetium and uranium from spent  $UO_2$  fuel in compacted bentonite clay. *J Nucl Mater*, 277, pp 288–294
- 4-14 **Ramebäck H, Albinsson Y, Skålberg M, Eklund U-B, 1999.** Radioanalytical procedures used to study the release of radionuclides from spent nuclear fuel and the diffusion into bentonite clay. SKB R-99-65, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-15 **Spahiu K, Sellin P, 2001.** Spent fuel alteration dissolution and the influence of near field hydrogen. Accepted for publication in *Scientific Basis for Radioactive Management*. Material Research Society Symposium Proceedings (K Hart editor)
- 4-16 **Parks G A, Pohl D C, 1988.** Hydrothermal solubility of uraninite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 863
- 4-17 **Rai D, Felmy A R, Ryan J L, 1990.** Uranium (IV) hydrolysis constants and solubility product of  $UO_2 \cdot x \cdot H_2O$  (am). *Inorg Chem*, 29, 260

- 4-18 **Eriksen T, 1996.** Radiolysis of water within a ruptured fuel element. SKB PR-U-96-29, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-19 **Christensen H, 1988.** Calculations simulating spent fuel leaching experiments. Nuclear Technology 124, 165
- 4-20 **Haschke J M, Allen T H, Stakebake J L, 1996.** Reaction kinetics of plutonium with oxygen, water and humid air. J Alloys and Compounds 243, 23
- 4-21 **King F, Quinn M J, Miller N H, 1999.** The effect of hydrogen and gamma radiation on the oxidation of  $\text{UO}_2$  in  $0.1 \text{ mol} \times \text{dm}^{-3}$  NaCl solution. SKB TR-99-27, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-22 **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. Accepted for publication in J Nucl Mater
- 4-23 **Obersby V M, 1999.** Uranium dioxide, SIMFUEL, and spent fuel dissolution rates – a review of published data. SKB TR-99-22, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-24 **Bruno J, Casas I, Puigdomenech I, 1991.** The kinetics of dissolution of  $\text{UO}_2$  under reducing conditions and the influence of an oxidized surface layer ( $\text{UO}_{2+x}$ ): Application of a continuous flow-through reactor. Geochim. Cosmochim. Acta, 55, pp 647–658
- 4-25 **Zetterström L, 2000.** Oklo, a review and critical evaluation of literature SKB TR-00-17, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-26 **Mathieu R, Zetterström L, Cuney M, Gauthier-Lafaye F, Hidaja H, 2001.** Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around the Oklo-Oklebondo and Bangombe natural nuclear reaction zones (Franceville basin, Gabon). Chemical geology, 171, pp 147–171
- 4-27 **Bruno J, Cera E, Grivé M, Eklund U-B, Eriksen T, 1999.** Experimental determination and chemical modelling of radiolytic processes at the spent fuel/water interface. SKB TR-99-26, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-28 **Rondinella V, Matzke H, Cobos J, Wiss T, Carbol P, 2001.** Alpha decay damage accumulation and leaching behavior of  $\text{UO}_2$  containing short lived actinides, accepted for publication in Scientific Basis for Radioactive Management. Material Research Society Symposium Proceedings (K Hart editor), Sydney
- 4-29 **Cui D, Spahiu K, 2001.** The reduction of U(VI) on a corrosion product of metallic iron under anoxic groundwater conditions. Submitted to Radiochim Acta
- 4-30 **Wersin P, Hochella M F, Persson P, Redden G, Leckie J O, Harris D W, 1994.** Interaction of aqueous uranium with sulfide minerals: Spectroscopic evidence of sorption and reduction. Geochim Cosmochim Acta, 58, 2829–2843
- 4-31 **Cross J E, Haworth A, Neretniks I, Sharland S M, Tweed C J, 1991.** Modelling of redox front and uranium movement in a uranium mine at Poços de Caldas. Radiochim Acta, 52/53, pp 445–451
- 4-32 **Spahiu K, 1999.** Research program on the kinetics of redox reactions of actinides and other nuclides in near field conditions. Svensk Kärnbränslehantering AB

- 4-33 **Albinsson Y, Nilsson H, 2001.** Studies of sorption of Th and reduction of Np(V) on  $\text{UO}_2(\text{s})$  and  $\text{TiO}_2(\text{s})$ . Accepted for publication in Scientific Basis for Radioactive Management. Material Research Society Symp Proceedings (K Hart ed), Sydney
- 4-34 **Blackwood D J, Naish C C, Platts N, Taylor K J, Thomas M I, 1995.** The anaerobic corrosion of carbon steel in granitic groundwaters. SKB PR 95-03, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-35 **El Aamrani F, Casas I, de Pablo J, Duro L, Grive M, Bruno J, 1999.** Experimental and modelling study of the interaction between uranium (VI) and magnetite. SKB TR-99-21, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 4-36 **El Aamrani S, Rovira M, de Pablo J, Casas I, Duro L, El Aamrani F, Bruno J, Spahiu K, 2001.** Surface mediated reduction of U(VI) by magnetite under  $\text{H}_2(\text{g})$  atmosphere. Submitted to Radiochimica Acta
- 4-37 **Knopp R, 2000.** Investigation of Pu(IV) and Th(IV) colloid formation by laser induced breakdown detection (LIBD), Workshop on solubility of actinides in relation with nuclear waste matrices. Mol, Belgium
- 4-38 **Neck V, Kim J I, 1999.** Solubility and hydrolysis of tetravalent actinides. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6350

## Kapitel 5

- 5-1 **Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-2 **SKB, 2000.** Systemanalys. Omhändertagande av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. SKB R-00-29, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-3 **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
- 5-4 **Erixon B, 2001.** Kollapslast kapslar med modifierade materialdata. SKB PM TI-01-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-5 **Pettersson K, 1996.** A constructive model for plastic deformation and creep in copper. SKB PM 96-3420-17, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-6 **Ahlbin J, 2001.** Plastic deformation and creep in copper: Coding, verification and implementation as a subroutine in ABACUS. SKB PM TI-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-7 **Korzhavyi P A, Abrikosov I A, Johansson B, 1999.** Theoretical investigation of the defect interactions in dilute copper alloys intended for nuclear waste containers. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXII, eds D J Wronkiewicz and J H Lee Mat Res Soc Symp Proc Vol 556, Materials Research Society, Warrendale, PA pp 895–902

- 5-8 **Korzhavyi P A, Abrikosov I A, Johansson B, 2000.** Theoretical study of bulk and surface properties of digenite  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII, eds R W Smith and D W Shoosmith Mat Res Soc Symp Proc Vol 608, Materials Research Society, Warrendale, PA, pp 115–120
- 5-9 **Korzhavyi P A, Johansson B, Lozovoi A Y, Alavi A, 2001.** Segregation of 3sp impurities to  $S=5(3\ 1\ 0)$  tilt grain boundary in copper. Presented at MRS Spring Meeting, San Francisco
- 5-10 **Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 1999.** Influence of phosphorous and sulphur as well as grain size on creep in pure copper. SKB TR-99-39, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-11 **Smart N R, Blackwood D J, Werme L, 2001.** The anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters. SKB TR-01-22, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-12 **Blackwood D J, Naish C C, 1995.** The effect of galvanic coupling between the copper outer canister and the carbon steel inner canister on the corrosion resistance of the advanced cold process canister. SKB PR 95-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-13 **Guinan M W.** Radiation effect in spent nuclear fuel canisters (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-14 **Puigdomènech I, Taxén C, 2000.** Thermodynamic data for copper. Implications for the corrosion of copper under repository conditions SKB TR-00-13, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-15 **Motamedi M, 1999.** The survival and activity of bacteria in compacted bentonite clay in conditions relevant to high level radioactive waste (HLW) repository Ph. D. Thesis, Department of Cell and Molecular Biology, Microbiology, Göteborg University
- 5-16 **Pedersen K, Motamedi M, Karnland O, Sandén T, 2000.** Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. Eng Geol 58, pp 149–161
- 5-17 **Pedersen K, Motamedi M, Karnland O, Sandén T, 2000.** Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling, compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. J Appl Microbiol 89, pp 1038–1047
- 5-18 **Milodowski A E, Styles M T, Hards V L, 2000.** A natural analogue for copper waste canisters: The copper-uranium mineralised concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom SKB TR-00-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-19 **Taxén C, 2000.** Pitting corrosion of copper. Equilibrium – mass transport limitations. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII, eds. R W Smith and D W Shoosmith Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 608, Materials Research Society, Warrendale, PA pp 103–108
- 5-20 **Fennell P A H, Graham A J, Smart N R, Sofield C J, 2001.** Grain boundary corrosion of copper canister material. SKB TR-01-09, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 5-21 **Ari-Lahti E, Bojinov M, Mäkelä K, Laitinen T, Saario T, 2000.** Stress corrosion cracking investigation of copper in groundwater with ammonium ions. Posiva Working Report 2000-46, Posiva Oy
- 5-22 **Pettersson K, Oskarsson M, 2000.** Stress corrosion crack growth in copper for waste canister applications. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII, eds. R W Smith and D W Shoemith Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 608, Materials Research Society, Warrendale, PA pp 95–101
- 5-23 **Pettersson K, 1996.** A study of recrystallization in copper SKB PM 96-3420-18, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-24 **Bond A E, Hoch A R, Jones G D, Tomczyk A J, Wiggins R M, Worraker W J, 1997.** Assessment of a spent fuel disposal canister with cast steel inner component. SKB TR-97-19, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-25 **Takase H, Benbow S, Grindrod P, 1999.** Mechanical failure of SKB spent fuel canisters. Mathematical modelling and scoping calculations. SKB TR-99-34, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 5-26 **Smart N R, Bond A E, Crossley J A A, Lovegrove P C, Werme L, 2000.** Mechanical properties of oxides formed by anaerobic corrosion of steel Presented at Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIV in Sydney, Australia

## Kapitel 6

- 6-1 **Pusch R, 1999.** Is montmorillonite-rich clay of MX-80 type the ideal buffer for isolation of HLW? SKB TR-99-33, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-2 **Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Uneven swelling pressure on the canister. FEM-calculation of the effect of uneven water supply in the rock. SKB PPM 98-3420-33, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-3 **Pusch R, 2000.** On the risk of liquefaction of buffer and backfill. SKB TR-00-18, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-4 **Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G, 1985.** Final report of the buffer mass test – Volume II: Test results. Stripa Project Technical Report 85-12, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-5 **Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Äspö Hard Rock Laboratory – Preparatory modelling for the backfill and plug test Scoping calculations of H-M processes. SKB IPR-99-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-6 **Pusch R, Adey R, 1999.** Creep in buffer clay. SKB TR-99-32, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-7 **Jing L, Stephansson O, Tsang C-F, Knight L J, Kautsky F, 1999.** Decovalex II Project. Executive summary. SKI report 99:24, Statens kärnkraftinspektion

- 6-8 **European Commission, 2000.** International Centre for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, Spain.  
Calculation and testing of the behaviour of unsaturated clay as a barrier in radioactive waste repositories (Catsius clay project).  
European Commission, EUR 19141 EN
- 6-9 **GRC, 1998.** COMPASS for WINDOWS – Introductory guide. Geoenvironmental Research Centre, Cardiff School of Engineering, Division of Civil Engineering, Cardiff University, Cardiff, UK
- 6-10 **UPC, 2000.** CODE\_BRIGHT, A 3D Program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. User's guide.  
Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain
- 6-11 **Karmland O, 1997.** Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation between model calculations and experimentally determined data.  
SKB TR 97-31, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-12 **Pusch R, Muurinen A, Lehtikainen J, Bors J, Eriksen T, 1999.** Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency.  
EUR 18950 EN, European Commission
- 6-13 **Pusch R, 2001.** The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environmental conditions.  
SKB TR-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-14 **Pusch R, Takase H, Benbow S, 1998.** Chemical processes causing cementation in heat-affected smectite – the Kinnekulle bentonite.  
SKB TR-98-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-15 **Pusch R, 1993.** Evolution of models for conversion of smectite to non-expandable minerals.  
SKB TR-93-33, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-16 **Pusch R, 2000.** On the effect of hot water vapor on MX-80 clay.  
SKB TR-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-17 **Huertas F, Farias J, Griffault L, Leguey S, Cuevas J, Ramírez S, de la Villa R V, Cobeña J, Andrade C, Alonso M C, Hidalgo A, Parneix J C, Rassineux F, Bouchet A, Meunier A, Decarreau A, Petit S, Vieillard P, 2000.** Effects of cement on clay barrier performance. Ecoclay project.  
EUR 19609 EN, European Commission
- 6-18 **Karmland O, Sandén T, Johannesson L-E, Eriksen T, 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
- 6-19 **Smellie J, 2001.** Wyoming bentonites: Evidence from the geological record to evaluate the suitability of bentonite as a buffer material during the long-term underground containment of radioactive wastes.  
SKB TR-01-26, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-20 **Huang W-L, Longo J, Pevear D, 1993.** An experimentally derived kinetic model for smectite to illite conversion and its use as a geothermometer.  
Clays and Clay Minerals, Vol 41, No 2

- 6-21 **SKI, 2000.** Opinions on SKB's safety assessments SR 97 and SFL 3-5. A review by SKI consultants.  
SKI report 00:47, Statens kärnkraftinspektion
- 6-22 **Pusch R, 1999.** Clay colloid formation and release from MX-80 buffer.  
SKB TR-99-31, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-23 **Motamedi M A, 1999.** The survival and activity of bacteria in compacted bentonite clay in conditions relevant to high level radioactive waste (HLW) repositories. Department of Cell and Molecular Biology, Lundberg Laboratory, Göteborg University
- 6-24 **Pusch R, 1999.** Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite – microstructural aspects.  
SKB TR-99-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-25 **Jansson M, 1999.** Diffusion of cations in bentonite clay – laboratory and in-situ studies. Licentiate thesis, TRITA-KKE-990, Department of Chemistry, Nuclear Chemistry, Royal Institute of Technology
- 6-26 **Jansson M, Eriksen T E, 2001.** CHEMLAB, A probe for in-situ radionuclide experiments. Diffusion studies.  
SKB TR-01-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 6-27 **Wold S, Eriksen T E, 2000.** Diffusion of organic colloids in compacted bentonite. The influence of ionic strength on molecular size and transport capacity of the colloids.  
SKB TR-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 7

- 7-1 **Pusch R, 1998.** Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectitic clay?  
SKB TR-98-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-2 **SKB, 2001.** Äspö hard rock laboratory. Annual report 2000.  
SKB TR-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-3 **Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Äspö Hard Rock Laboratory – Preparatory modelling for the backfill and plug test. Scoping calculations of H-M processes  
SKB IPR-99-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-4 **Börgesson L, Johannesson L-E, Sandén T, 1996.** Backfill materials based on crushed rock. Geotechnical properties.  
SKB HRL-96-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-5 **Johannesson L-E, Börjesson L, Sandén T, 1999.** Backfill materials based on crushed rock (part 2); Geotechnical properties determined in laboratory.  
SKB ÄHRL IPR 99-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-6 **Pusch R, 2001.** Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectitic clay.  
SKB TR-01-07, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-7 **Moreno L, 2000.** Impact of the water flow rate in the tunnel on the release of radionuclides.  
SKB TR-00-03, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 7-8 **Larsson H, Kenne A, Edelsvärd C, 1997.** Främmande material i djupförvaret. Tillförsel och fördelning i deponeringsområdena för kapslar. SKB PR D-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-9 **Hedin A, 2001.** Integrated analytic radionuclide transport model for a KBS 3 repository. Submitted to Nuclear Technology
- 7-10 **Lindgren M, Lindström F, 1999.** SR 97 – Radionuclide transport calculations SKB TR-99-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 7-11 **Cliffe K A, Morris S T, Porter J D, 1998.** Assessment model validity document. NAMMU: A program for calculating groundwater flow and transport through porous media. SKB R-99-51, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 8

- 8-1 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-2 **Norman S, 1992.** HYDRASTAR – a code for stochastic simulation of groundwater flow SKB TR 92-12, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-3 **Cliffe K A, Morris S T, Porter J D, 1999.** Assessment model validity document. NAMMU: A program for calculating groundwater flow and transport through porous media. SKB R-99-51, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999
- 8-4 **Marsic N, Hartley L, Jackson P, Poole M, Morvik A (under bearb).** Development of a hydrogeological modelling methodology using NAMMU Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-5 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-6 **Svensson U, 1999.** A laboratory scale analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area. SKB TR-99-24, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-7 **Svensson U, 1999.** Representation of fracture networks as grid cell conductivities. SKB TR-99-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-8 **SKB, 2001.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret. SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-9 **Posiva, 2000.** Disposal of spent fuel in Olkiluoto bedrock. Programme for research, development and technical design for the pre-construction phase. Posiva 2000-14, Posiva Oy, Helsinki, Finland
- 8-10 **Jarsjö J, Destouni G, Gale J, 2000.** Groundwater degassing and two-phase flow in fractured rock: Summary of results and conclusions achieved during the period 1994–2000. SKB TR-01-13, Svensk Kärnbränslehantering AB



- 8-11 **Rodwell W R, Harris A W, Horseman S T, Lalieux P, Müller W, Ortiz Amaya L, Preuss K, 1999.** Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste European Commission/Nuclear Energy Agency, EUR 19122 EN
- 8-12 **Nordlund E, Li C, Carlsson B, 1999.** Äspö Hard Rock laboratory. Prototype repository. Mechanical properties of the diorite in the prototype repository at Äspö HRL. Laboratory tests.  
SKB IPR-99-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-13 **Hakami E, Olofsson S-O.** Numerical modelling of fracture displacements due to thermal load from A KBS-3 repository (under bearb).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-14 **La Pointe P, Cladouhos T 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
- 8-15 **Wänstedt S, 2000.** Geophysical and geological investigations of the Boda area.  
SKB R-00-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-16 **Carlsten S, Strähle A, 2000.** Borehole radar and BIPS investigations in boreholes at the Boda area.  
SKB TR-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-17 **Tullborg E-L, Larsson S Å, Morad S, 2001.** Dating methods and geochronology of fractures and movements in bed rock: a review.  
SKB TR-01-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-18 **Nordlund E, Li C, Carlsson B, 1999.** Äspö Hard Rock laboratory. Prototype repository. Mechanical properties of the diorite in the prototype repository at Äspö HRL. Laboratory tests.  
SKB IPR-99-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-19 **Laaksoharju M, 1999.** Groundwater characterisation and modelling: problems, facts and possibilities.  
SKB TR-99-42, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-20 **Puigdomènech 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
- 8-21 **Laaksoharju M, Wallin B, 1999.** Evolution of the groundwater chemistry at the Äspö Hard Rock Laboratory. Proceedings of the second Äspö International Geochemistry Workshop, June 6–7, 1995.  
SKB HRL ICR 97-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-22 **Vieno T, 2000.** Groundwater salinity at Olkiluoto and its effects on a spent fuel repository.  
Posiva 2000-11, Posiva Oy, Helsinki, Finland
- 8-23 **Glynn P D, Voss C I, Provost A M, 1999.** Deep penetration of oxy-generated meltwaters from warm based ice-sheets into the Fennoscandian Shield. In Use of Hydrogeochemical Information in Testing Groundwater Flow Models, Workshop Proceedings. Borgholm, Sweden 1–3 Sept 1997 ed OECD NEA, pp 201–241. OECD, Nuclear Energy Agency, Paris, France

- 8-24 **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
- 8-25 **Gierup J, Johansson R, Persson M, Stølen L K, Thunholm B, Wahlgren C-H, Wikman H, 1999.** Översiktsstudie av Kronobergs län. Geologiska förutsättningar.  
SKB R-99-19, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-26 **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).  
European Commission, EUR 19613 EN
- 8-27 **Landström O, Tullborg E-L, Eriksson G, Sandell Y, 2001.** Effects of glacial/postglacial weathering compared with hydrothermal alteration – implications for matrix diffusion.  
SKB R-01-37, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-28 **Puigdomenech I, Ambrosi J-P, Eisenlogh L, Lartigue J-E, Banwart S A, Bateman K, Milodowski A, 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.** O<sub>2</sub> depletion in granitic media. The REX project.  
SKB TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-29 **Kotelnikova S, Pedersen K, 1999.** The microbe-REX project: Microbial O<sub>2</sub> consumption in the Äspö tunnel.  
SKB TR-99-17 pp 1–73, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-30 **Pedersen K, 2000.** Microbial processes in radioactive waste disposal  
SBK TR-00-04 pp 1–97, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-31 **Pedersen K, 2000.** Test plan for the microbiology site. In situ sampling and monitoring of past and present microbial activity at conditions relevant to the repository environment.  
SKB ITD-00-16 pp 1–23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-32 **Pedersen K, 2001.** The MICROBE site. Drilling, instrumentation and characterisation.  
SKB IPR-00-36, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-33 **Laaksoharju M, Degueudre C, Skårman C, 1995.** Studies of colloids and their importance for repository performance assessment.  
SKB TR 95-24, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-34 **Kersting A B, Efured D W, Finnegan D L, Rokop D J, Smith D K, Thompson J L, 1999.** Migration of plutonium in groundwater at the Nevada Test Site. *Nature*, 397, 7 January, 56–59
- 8-35 **Haveman S A, 2001.** Subsurface microbial ecosystems. Community composition and interactions with the geosphere (Doctoral thesis).  
Department of Cell and Molecular Biology, Microbiology, Göteborg University
- 8-36 **Laaksoharju M, Gurban I, Skårman C, 1998.** Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB TR 98-03, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 8-37 **Ohlsson Y, 2001.** Studies of ionic diffusion in crystalline rock  
Kemiteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, ISBN 91-7283-025-5
- 8-38 **Byegård J, Johansson H, Skålberg M, 1998.** The interaction of sorbing and non-sorbing tracers with different Äspö rock types. Sorption and diffusion experiments in the laboratory scale.  
SKB TR-98-18, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-39 **Johansson H, 2000.** Retardation of tracers in crystalline rock  
Kärnkemi, Chalmers Tekniska Högskola, ISBN 91-7197-893-3
- 8-40 **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
- 8-41 **Cvetkovic V, Cheng H, Selroos J O, 2000.** First TRUE Stage. Evaluation of tracer retention understanding experiments (first stage) at Äspö.  
SKB HRL ICR-00-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-42 **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
- 8-43 **Painter S, Cvetkovic V, Selroos J O, 2000.** Power-law velocity fluctuations in networks of rock fractures: Numerical evidence and consequences for contaminant transport, abstract in 2000.  
American Geophysical Union Spring Meeting, Washington DC, USA
- 8-44 **Byegård J, Albinsson Y, Skarnemark G, Skålberg M, 1992.** Field and laboratory studies of the reduction and sorption of technetium(VII).  
Radiochimica Acta, 58/59, 239–244
- 8-45 **Cui D, 1996.** Sorption processes and solubilities of radionuclides in deep granite fracture systems. Kärnkemi, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 0349-6465
- 8-46 **Jakobsson A-M, 1999.** Measurements and modelling using surface complexation of cation sorption onto mineral oxides. Kärnkemi, Chalmers Tekniska Högskola, ISBN 91-7197-843-7
- 8-47 **Kertsting A, Efurud D, Finnegan D, Rokop D, Smith D, Thopmson J, 1999.** Migration of plutonium in the ground water at the Nevada Test Site.  
Nature, Vol 397, January 1999, pp 56–59
- 8-48 **Knapp R B, Chiarappa M L, Durham W B, 2000.** An experimental exploration of the transport and capture of abiotic colloids in a single fracture.  
Water Resour Res, 36, 3139–3149
- 8-49 **Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package.  
SKB TR-90-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-50 **Hedin A, 2001.** Integrated analytic radionuclide transport model for a KBS-3 repository. Submitted to Nuclear Technology
- 8-51 **Hedin A, 2001.** Very fast probabilistic dose calculations and uncertainty analyses. Proceedings from the third international symposium on Sensitivity Analysis of Model Output, SAMO

- 8-52 **Elert M, 1999.** Evaluation of modelling of the TRUE-1 radially converging and dipole tests with conservative tracers. The Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Tasks 4C and 4D. SKB TR-99-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-53 **Elert M, Svensson H, 2001.** Evaluation of modelling of the TRUE-1 radially converging tests with sorbing tracers. The Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Tasks 4E and 4F. SKB TR-01-12, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 8-54 **Cvetkovic V, Selroos J O, Cheng H, 1999.** Transport of reactive tracers in rock fractures. *J Fluid Mech*, 378, 335–356

## Kapitel 9

- 9-1 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport, Del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-2 **SKB, 2001.** Slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR 1. Slutlig säkerhetsrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-3 **SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-4 **SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-5 **SSI FS 1998:1, 1988.** Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall (Swedish Radiation Protection Institute's Code of Statutes). SSI FS 1998:1, Statens strålskyddsinstitut
- 9-6 **OECD, 2000.** SR 97. Post-closure safety of a deep repository for spent nuclear fuel in Sweden. An international peer review. OECD Nuclear Energy Agency Paris, France
- 9-7 **Chapman N, Apted M, Glasser F, Kessler J, Voss C, 2000.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall i Sverige. En internationell expertgranskning av SKB:s preliminära säkerhetsanalys. SKI rapport 00:54, Statens kärnkraftinspektion
- 9-8 **SKI, SSI, 2000.** SKI:s och SSI: gemensamma granskning av SKB:s Säkerhetsrapport 97. Granskningsrapport. SKI Rapport 00:39, Statens kärnkraftinspektion  
SSI-rapport 2000:17, Statens strålskyddsinstitut
- 9-9 **Edlund O, Bergström U, Hallberg B, Karlsson S, 1999.** A summary of biospheric research 1975–1997. SKB TR-99-40, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-10 **SKB, 1999.** SR 97 – Processer i förvarets utveckling. Underlagsrapport till SR 97. Svensk Kärnbränslehantering AB

- 9-11 **Kautsky U, Meili M, Bergström U.** Processer i biosfären (under bearb).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-12 **Kautsky U, et al.** Biosphere interaction matrix (under bearb).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-13 **Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsunderökningar för ett djupförvar.  
SKB R-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-14 **Furuheim M.** Transferfaktorer. En meta-data studie om vilka variabler som påverkar variationen i transferfaktorer (i manus).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-15 **Karlsson S, Meili M, Bergström U.** Bioaccumulation factors in aquatic ecosystems – data presentation (i manus).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-16 **Johansson K J, 2000.** Iodine in soil.  
SKB TR-00-21, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-17 **Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments – Modules for various biosphere types.  
SKB TR-99-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-18 **Karlsson S, Bergström U, Meili M, 2001.** Models for dose assessments. Models adapted to the SFR-area, Sweden.  
TR-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-19 **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
- 9-20 **BIOMOVS II, 1996.** Development of reference biospheres methodology for radioactive waste disposal.  
TR6, Statens strålskyddsinstitut
- 9-21 **BIOMOVS II, 1996.** Uncertainty and validation: Effect of user interpretation on uncertainty estimates.  
TR7, Statens strålskyddsinstitut
- 9-22 **BIOMOVS II, 1996.** Biosphere modelling for dose assessments of radioactive waste repositories: Final report of the complementary studies working group.  
TR12, Statens strålskyddsinstitut
- 9-23 **Zach R, 1997.** Nuclear fuel waste management – Biosphere program highlights – 1978 to 1996. AECL –11811, AECL Pinawa, Manitoba, Canada
- 9-24 **Nordlinder S, Bergström U, Mathiasson L, 1999.** Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB TR-99-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-25 **Lindborg T, Schöldt R, 1998.** The biosphere at Aberg, Beberg and Ceberg – a description and evaluation of climate, physical geography, ecology, landuse and environment.  
SKB TR-98-20, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 9-26 **Karlsson S, Bergström U, Rosén K, 2000.** Sensitivity analysis for modules for various biosphere types.  
SKB R-00-39, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-27 **Kautsky U, 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area.  
A summary of knowledge for the SAFE project.  
SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-28 **Kumblad L, 1999.** A carbon budget for the aquatic ecosystem above SFR in Öregrundsgrepen.  
SKB R-99-40, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-29 **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
- 9-30 **Engqvist A, 1997.** Water exchange estimates derived from forcing for the hydraulically coupled basins surrounding Äspö island and adjacent coastal water.  
SKB TR 97-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-31 **Engqvist A, Andrejev O, 1999.** Water exchange of Öregrundsgrepen – A baroclinic 3d-model study.  
SKB TR-99-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-32 **Engqvist A, Andrejev O, 2000.** Sensitivity analysis with regard to variations of physical forcing including two hydrographic scenarios for the Öregrundsgrepen – A follow-up baroclinic 3D-model study.  
SKB TR-00-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-33 **Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR.  
SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-34 **Widén E, 2001.** Groundwater flow into and out of two lakes partly surrounded by peatland. Thesis report series 2001:6, Division of land and water resources.  
Royal Institute of Technology
- 9-35 **Holswilder J, 2000.** Transfer of radionuclides in marine food chains depending on nutrient availability for phytoplankton.  
Dep. Marine Sciences, University of Kalmar
- 9-36 **Laaksoharju M, Gurban I.** Sampling of surface water and shallow groundwater at Laxemar: Possible indicators for interactions between deep groundwaters and the biosphere (under bearb).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-37 **Avila R M, 1998.** Radiocaesium transfer to roe deer and moose  
Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala. Ph D thesis, Acta Univ Agr. Suec. Agraria 136
- 9-38 **Avila R, Moberg L, Hubbard L, 1998.** Modelling of radionuclide migration in forest ecosystems. A literature review.  
SSI report 98:07, Statens strålskyddsinstitut
- 9-39 **SSI, 1999.** An integrated approach to radionuclide flow in semi-natural ecosystems underlying exposure pathways to man. Final report of the LANDSCAPE project  
SSI rapport 99:19, Statens strålskyddsinstitut

- 9-40 **BIOMOVS II, 1996.** Model validation studies of water flow and radionuclide transport in vegetated soils using lysimeter data.  
TR-15, Statens strålskyddsinstitut
- 9-41 **IAEA, 2000.** Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems: final report on the BIOMASS. Forest Working Group activities 1998–2000. IAEA Vienna, Austria (draft)
- 9-42 **Bergman R.** Inflow and redistribution in peat- and forest lands of Cs-135 from deep bedrock repositories (i manus).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-43 **Rolff C, Ågren G I, 1999.** Predicting effects of different harvesting intensities with a model of nitrogen limited forest growth.  
Ecological Modelling. 118 (2–3), pp 193–211.
- 9-44 **Brunberg A K, Blomqvist P, 1998.** Vatten i Uppsala län 1997 – Beskrivning, utvärdering, åtgärdsförslag. Rapport nr 8/1998, Upplandsstiftelsen Uppsala.
- 9-45 **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.
- 9-46 **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.
- 9-47 **Brydsten L, 1999.** Shore level displacement in Öregrundsgrepen.  
SKB TR-99-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 9-48 **Bergström L, 2001.** Late Holocene distribution of lake sediment and peat in NE Uppland, Sweden.  
SKB R-01-12, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-49 **Wastegård S, Borgmark A, 2000.** Holocene climate fluctuations in western middle Sweden as inferred from a peat sequence dated by AMS and tephrochronology. Submitted to (dec 2000) The Holocene
- 9-50 **Kumblad L.** Processes influencing radionuclide transport in coastal sediments a literature review (i manus).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-51 **Brydsten L, 1999.** Change in coastal sedimentation conditions due to positive shore displacement in Öregrundsgrepen.  
SKB TR-99-37, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-52 **Ingmar T, 1975.** Sjöavsnörningar från aktualgeologiska synpunkter. En översikt. Meddelanden från Växtbiologiska Institutionen, Uppsala. 1975:1:1–90
- 9-53 **Nilsson E, 2001.** Methods to measure biomass and production of bacteria and algae. A literature study.  
SKB R-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-54 **Nilsson E, 2001.** A preliminary carbon budget for two oligotrophic hardwater lakes in the Forsmark area, Sweden.  
SKB R-01-24, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 9-55 **Meili M, Holmberg P, Jonsson P, Persson J.** Characteristics, fluxes, and <sup>137</sup>Cs content of sediments along the Swedish coast of the Bothnian Sea. Field investigations in 1998 to generate data for calibrating models to reconstruct and predict the dispersal of pollutants in time and space on local, regional, and larger scales, focusing on a discharge of radionuclides from SFR to the Baltic Sea (i manus).  
Phase 1: Sample collection and analysis  
Phase 2: Data compilation and evaluation  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-56 **Påsse T, 1996.** A mathematical model of the shore level displacement in Fennoscandia.  
SKB TR 96-24, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-57 **Påsse T, 1997.** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia.  
SKB TR 97-28, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-58 **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
- 9-59 **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
- 9-60 **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: p. 2381–2385
- 9-61 **Boulton G S, Hulton N, Wallroth T, 1996.** Impacts of long-term climate change on subsurface conditions: Time sequences, scenarios and boundary conditions for safety assessments.  
SKB PR-U-96-19, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-62 **Berger A, Loutre M F, Gallee H, 1996.** Sensitivity of the LLN 2-D climate model to the astronomical and CO<sub>2</sub> forcings (from 200 kyr BP to 130 ky AP). Univ. Catholique de Louvain Louvain-la-Neuve, Belgium. Scientific report 1996/1
- 9-63 **Westman P, Wastegård S, Schoning K, Gustafsson B, Omstedt A, 1999.** Salinity change in the Baltic Sea during the last 8500 years: evidence, causes and models.  
SKB TR-99-38, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-64 **Gustafsson B, Omstedt A, Westman P, Wastegård S, Schoning K.** Salinity change in the Baltic Sea in the future (i manus).  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-65 **Losjö K, Johansson B, Bringfelt B, Oleskog I, Bergström S, 1998.** Groundwater recharge – climatic and vegetation induced variations simulations in the Emån and Äspö areas in southern Sweden.  
SKB TR-99-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-66 **Holmgren K, Karlén W, 1998.** Late quaternary changes in climate.  
SKB TR-98-13, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-67 **Holmgren K, et al, 1999.** A 3000-year high-resolution stalagmitebased record of palaeoclimatic of northeastern South Africa.  
*The Holocene*. 9: pp 295–309



- 9-68 **Boulton G S, Wallroth T, Morén L, Kautsky U, 2001.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-69 **Rummukainen M, Bergström S, Erland Källén, Moen L, Rodhe J, Tjernström M, 2001.** SWECLIM – The first three years. Reports Meteorology and Climatology 94, SMHI Norrköping
- 9-70 **Clarke R, 1999.** Control of low-level radiation exposure: time for a change? J Radiol Prot 19: pp 107–115
- 9-71 **SKB, 1999.** SR 97 – Data and data uncertainties compilation of data and evaluation of data uncertainties for radionuclide transport calculations. SKB TR-99-09, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-72 **Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99. Posiva 99-07, Posiva Oy, Helsinki, Finland
- 9-73 **JNC, 2000.** H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan: Supporting Report 3 Safety Assessment of the Geological Disposal System.: Japan Nuclear Cycle Development Institute Tokai-Mura, Japan.JNC TN1410 2000-004
- 9-74 **EPRI, 2000.** Evaluation of the candidate high-level radioactive waste repository at Yucca Mountain using total system performance assessment: Phase 5. EPRI Palo Alto, CA.1000802
- 9-75 **SKB, 2000.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret. SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-76 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-77 **Lindell S, Ambjörn C, Juhlin B, Larsson-McCann S, Lindquist K, 1999.** Available climatological and oceanographical data for site investigations of surface ecosystems. SKB R-99-70, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-78 **Haldorson M, 2000.** Statistics available for site studies in registers and surveys at Statistics Sweden. SKB R-00-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-79 **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
- 9-80 **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
- 9-81 **Kyläkorpi L, Berggren J, Larsson M, Liberg M, Rydgren B, 2000.** Biological variables for the site survey of surface ecosystems – existing data and survey methods. SKB R-00-33, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 9-82 **Kyläkorpi L, Berggren J.** Datarapport Forsmark – ytnära ekosystem (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-83 **Kyläkorpi L, Berggren J.** Datarapport Simpevarp – ytnära ekosystem (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-84 **Brydsten L, 2001.** Beskrivning av de data som ingår i GIS – applikationen ”Uppland”. Intern rapport, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-85 **Kautsky H, Plantman P, Borgiel M, 1999.** Quantitative distribution of aquatic plant and animal communities in the Forsmark area. SKB R-99-69, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-86 **Isaeus M, 1998.** Description of the brackish environment in the Forsmark area. SKB PR-U-98-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 9-87 **Lindborg T, Schüldt R, 1998.** Description of the terrestrial biosphere and primary production in the coastal area of SFR. SKB PR-U-98-16, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 10

- 10-1 **Wikberg P, Ericsson L O, Rhén I, Wallroth T, Smellie J, 1995.** SKB Framework for regional groundwater modelling including geochemical-hydrogeological model integration and palaeohydrogeology-. Äspö HRL PR-25-95-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 10-2 **Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 2001.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 10-3 **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). European Commission, EUR 19613 EN
- 10-4 **Boulton G S, Broadgate M, Lunn R, Maillot B, Zatsepin S, Vidstrand P, Casanova J, Thiery D, Kervevan C, Bourguignon A, Negrel P, Schelkes K, DeLisel G, Köster E, Vogel P, Söfner B, Klinge H (under bearb).** Palaeohydrology an geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (PAGEPA). Final report. European Commission

## Kapitel 11

- 11-1 **Miller W, Alexander R, Chapman N, McKinley I, Smellie J, 2000.** Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Waste Management Series, Vol. 2, ISBN 0-08-043853-9, Pergamon, Elsevier Science, Amsterdam
- 11-2 **SKB, 1992.** SKB 91. Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Berggrundens betydelse för säkerheten. Svensk Kärnbränslehantering AB

- 11-3 **Nagra, 1994.** KRISTALLIN-I. Safety assessment report.  
Nagra Technical Report Series NTB 93-22, Nagra, Wettingen, Schweiz
- 11-4 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter  
förslutning. Huvudrapport, Del II.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-5 **Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in  
Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara.  
TILA-99. Posiva Technical Report 99-07, Posiva Oy, Helsingfors
- 11-6 **AECL.** Environmental impact statement on the concept for disposal of Canada:s  
nuclear fuel waste. Atomic Energy of Canada Ltd Report, AECL-10711,  
COG-93-1, Pinawa Manitoba, Kanada p 313
- 11-7 **Bruno J, Cera E, de Pablo J, Duro L, Jordana S, Savage D, 1997.**  
Determination of radionuclide solubility limits to be used in SR 97. Uncertainties  
associated to calculated solubilities.  
SKB TR-97-33, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-8 **Gurban I, Laaksoharju M, Madé B, Ledoux E, 1999.** Uranium transport  
around the reactor zone at Okelobondo. Data evaluation with M3 and HYTEC.  
SKB TR-97-36, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-9 **Murphy W M, Pickett D A, Percy E C, Turner D R, 2000.** Peña Blanca  
data in source term and performance assessment models for Yucca Mountain.  
In von Maravic H and Alexander W R (eds) Natural Analogue Working Group,  
8<sup>th</sup> meeting in Strasbourg, March 1999  
EC Nuclear Science and Technology Report, EC, Luxemburg
- 11-10 **Rivas P, Hernán P, Bruno J, Carrera J, Gómez P Guimerà J, Marin C,  
Pérez del Villar L, 1997.** El Berrocal project. Characterisation and validation  
of natural radionuclide migration processes under real conditions in the fissured  
granitic environment  
CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 17478, CEC, Luxemburg
- 11-11 **Hallberg R O, Östlund P, Wadsten T, 1988.** Inferences from a corrosion study  
of a bronze cannon, applied to high level waste disposal.  
Applied Geochemistry, 3, pp 273–280
- 11-12 **Vieno T, Hautojärvi A, Koskinen L, Nordman H, 1992.** TVO-92. Safety  
analysis of spent fuel disposal. Report YJT-92-33-E (p 90), Nuclear Waste  
Commission of Finnish Power Companies, Helsingfors, Finland
- 11-13 **Mattsson E, 1983.** Corrosion resistance of a copper canister for spent  
nuclear fuel.  
SKB TR 83-24, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-14 **SKBF/KBS, 1983.** KBS-3. Final storage of spent nuclear fuel. Part III.  
Svensk Kärnbränsleförsörjning AB
- 11-15 **Crissman D, Jacobs G, 1982.** Native copper deposits of the Portage Lake  
Volcanics, Michigan. Their implications with respect to canister stability for  
nuclear waste isolation in Columbia River basalts beneath the Hanford site,  
Washington. Rockwell Hanford Operations Technical Report, RHO-BW-ST-26P,  
Washington, USA

- 11-16 **Marcos N, Ahonen L, 1999.** New data on the Hyrkkölä U-Cu mineralisation. The behaviour of native copper in a natural environment. Posiva Technical Report 96-23, Posiva, Helsingfors, Finland
- 11-17 **Milodowskis A E, Styles M T, Hards V L, 2000.** A natural analogue for copper waste canisters. The copper uranium mineralised concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom  
SKB TR-00-11, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000
- 11-18 **Hellmuth K-H, 1994.** Natural analogue study on native iron. In von Maravic H and Smellie J (eds) Natural Analogue Working Group, 5<sup>th</sup> meeting in Toledo, October 1992. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 15176, pp 333-342, CEC, Luxemburg
- 11-19 **Johnson A B, Francis B, 1980.** Durability of metals from archeological objects, metal meteorites and native metals.  
Battelle Pacific Northwest Laboratory Report, PNL-3198, Washington, USA
- 11-20 **Angus N S, Brown G T, Cleere H F, 1962.** The iron nails from the Roman legionary fortress at Inchtuthil, Perthshire  
Journal of Iron and Steel Institute, 200, pp 956-968
- 11-21 **Lombardi S, Valentini G, 1996.** The Dunarobba forest as natural analogue: analysis of the geoenvironmental factors controlling the wood preservation. In: von Maravic H and Smellie J (eds) Natural Analogue Working Group, 6<sup>th</sup> meeting, Santa Fe, September 1994. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 16761, pp 127-133, CEC, Luxemburg
- 11-22 **Pusch R, Karnland R, 1988.** Geological evidence of smectite longevity. The Sardinian and Gotland cases.  
SKB TR 88-26, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-23 **González J L (ed), 1996.** Alteration hidrotermal de las bentonitas de Almeria ENRESA Publication Tecnica Num. 06/96, Madrid, Spanien
- 11-24 **McKinley I, Bath A, Berner U, Cace M, Chapman N, 1988.** Results of the Oman natural analogue study.  
Radiochim. Acta, 44/45, pp 311-316
- 11-25 **Beda Hofmann B A, 1989.** Geochemical analogue study in the Krunkelbach mine, Menzenschwand, Southern Germany: geology and water-rock interaction  
Materials Research Society, Proceedings 127, XII. pp 921-926
- 11-26 **Kersting A B, Efurud D W, Finnegan D L, Rokop D K, Thompson J L, 1999.** Migration of plutonium in groundwater at the Nevada Test Site.  
Nature, Vol 397, pp 56-59
- 11-27 **Allard B, Karlsson F, Neretnieks I, 1991.** Concentrations of particulate matter and humic substances in deep groundwaters and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides.  
SKB TR 91-50, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 11-28 **Smellie J A T, Karlsson F, Alexander W R, 1997.** Natural analogue studies: Present status and performance assessment implications.  
J. Contam. Hydrol., Vol. 26, pp 3-17

- 11-29 **Blomqvist R (ed), 2001.**The Palmottu natural analogue project. Phase II: Transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu. Final Report Phase II. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 19611 EN, CEC, Luxemburg
- 11-30 **Gauthier-Lafaye F, Ledoux E, Smellie J, Louvat D, Michand V, Pérez del Villar L, Oversby V, Bruno J, 2000.** Oklo natural analogue. Phase II. Behaviour of nuclear reaction products in a natural environment. European Commission, EUR 19139 EN, EC, Bryssel, Belgien

## Kapitel 12

- 12-1 **Bossart P, Hermanson J, Mazurek M, 2001.** Äspö Hard Rock Laboratory. Analysis of fracture networks based on the integration of structural and hydrogeological observations on different scales. SKB TR-01-21, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-2 **Mazurek M, Bossart P, Eliasson T, 1996.** Classification and characterization of water-conducting features at Äspö: Results of investigations on the outcrop scale. SKB HRL ICR 97-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-3 **Rhén I, Forsmark T, 2000.** Äspö Hard Rock Laboratory. High-permeability features (HPF). SKB IPR-00-02, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-4 **Winberg A, Andersson P, Hermansson 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
- 12-5 **Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997.** ZEDEX – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR 97-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-6 **Banwart S (ed), 1995.** The Äspö redox investigations in block scale. Project summary and implications for repository performance assessment. SKB TR 95-26, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-7 **Puigdomenech I, Ambrosi J-P, Eisenlohr L, Lartigue J-E, Banwart S A, Bateman K, Milodowski A E, West J M, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Yoshida H, Kotelnikova S, Pedersen K, Michaud V, Trotignon L, Rivas Perez J, 2001.** O<sub>2</sub> depletion in granitic media. The REX project. SKB TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-8 **Jarsjö J, Destouni G, Gale J, 2001.** Groundwater degassing and two-phase flow in fractured rock: Summary of results and conclusions achieved during the period 1994–2000. SKB TR-01-13, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-9 **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). European Commission, EUR 19613 EN

- 12-10 **SKB, 2001.** Summary of results from testing of barriers (SURT).  
SKB R-01-40, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-11 **Jansson M, Eriksen T E, 2001.** A probe for in-situ radionuclide experiments.  
Diffusion studies.  
SKB TR-01-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-12 **Pedersen K, 2000.** Äspö Hard Rock Laboratory. The microbe site. Drilling,  
instrumentation and characterisation.  
SKB IPR-00-36, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-13 **Laaksoharju M, 2000.** Äspö Hard Rock Laboratory. Project description of the  
Äspö project COLLOID with the aim to investigate the stability and mobility  
of colloids.  
SKB IPR-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-14 **Smellie J (ed.), 2000.** Status report of the matrix fluid experiment.  
June 1988–June 2000.  
SKB IPR-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-15 **SKB, 1998.** FUD-program 98. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.  
Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och  
geologisk djupförvaring  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-16 **Karnland O, Sandén T, Johannesson L-E, Eriksen T, 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
- 12-17 **Smellie J, Laaksoharju M, 1992.** The Äspö Hard Rock Laboratory: Final  
evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing  
geologic and hydraulic conditions.  
SKB TR-92-31, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-18 **Rhén I, Gustafson G, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation  
1997/4. Results from pre-investigations and detailed site characterization.  
Comparison of predictions and observations. Hydrogeology, groundwater  
chemistry and transport of solutes.  
SKB TR-97-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-19 **Rhén I (ed.), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL –  
Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995  
(pp 287–317).  
SKB TR-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-20 **Munier R, Hermanson J, 2001.** Metodik för geometrisk modellering.  
Presentation och administration av platsbeskrivande modeller.  
SKB R-01-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-21 **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

- 12-22 **Gustafson G, Ström A, 1995.** The Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Evaluation report on Task No 1, the LPT2 large scale field experiments.  
SKB HRL ICR 95-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-23 **Birgersson L, Widen H, Ågren T, Neretnieks I, Moreno L, 1993.** Scoping calculations for the matrix diffusion experiment.  
SKB HRL ICR 93-03, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-24 **Nordqvist R, Gustafsson E, Andersson P, 1993.** Scoping calculations for the multiple well tracer experiment – efficient design for identifying transport processes.  
SKB HRL ICR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-25 **Moreno L, Neretnieks I, 1994.** Scoping calculations for the multiple well tracer experiment using a variable aperture model.  
SKB HRL ICR 94-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-26 **Svensson U, 1994.** The multiple well tracer experiment – Scoping calculations.  
SKB HRL ICR 94-03, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-27 **Selroos J-O, Winberg A, Cvetkovic V, 1994.** Design constraints and process discrimination for the detailed scale tracer experiments at Äspö – Multiple well tracer experiment and matrix diffusion experiment.  
SKB HRL ICR 94-04, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-28 **Gustafson G, Ström A, Vira J, 1997.** The Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Evaluation report on Task No 3, the Äspö tunnel drawdown experiment.  
SKB HRL ICR 97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-29 **Tanaka Y, Hasegawa T, Kawanishi M, 1997.** Numerical analysis with FEGM/FERM for TRUE-1 non-sorbing tracer tests.  
SKB HRL ICR 97-07, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-30 **Gylling B, Khademi B, Moreno L, 1998.** Modelling of the tracer retention understanding experiment Task 4C-D using the channel network model.  
SKB HRL ICR 98-01, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 12-31 **Wikberg P, 1998.** Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Modelling task #5: Impact of the tunnel construction on the groundwater system at Äspö, a hydrological-hydrochemical model assessment exercise.  
SKB HRL PR-98-07, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 13

- 13-1 **SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-2 **SKB, 2000.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering av platser för djupförvaret  
SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 13-3 **SKB, 2001.** Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram  
SKB R-01-10, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-4 **Munier R, Hermanson J, 2000.** Metod för hantering av geometrisk osäkerhet vid tolkning av sprickor och sprickzoner.  
SKB TD-00-39, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-5 **Munier R, Hermanson J, 2001.** Metodik för geometrisk modellering. Presentation och administration av platsbeskrivande modeller.  
SKB R-01-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-6 **Ekman L, 2001.** Project deep drilling KLX02 – phase 2. Scope of activities and results. Summary report.  
SKB TR-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-7 **Bergman B, Juhlin C, Palm H, 2001.** Reflektionsseismiska studier inom Laxemarområdet.  
SKB R-01-07, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 13-8 **Ask D, 2001.** Inversion and interpretation of hydraulic and overcoring stress measurements in the Äspö region, Sweden. Licentiate thesis, Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Stockholm
- 13-9 **Martin C D, Christiansson R, 1991.** Overcoring in highly stressed granite – the influence of microcracking.  
Int J Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstr, vol 28, No 1 pp 53–70
- 13-10 **Rutqvist R, Tsang C-F, Stephansson O, 2000.** Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture. Int J of Rock Mech and Mining Sc 37
- 13-11 **Meigs L (ed), Beauheim R L (ed), Jones T L (ed), 2000.** Interpretations of tracer tests performed in the Culebra Dolomite at the Waste Isolation Pilot Plant Site. SAND97-3109, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM and Livermore, CA, USA
- 13-12 **McNeish J A, Andrews R W, Vomvoris S, 1990.** Interpretation of the tracer testing conducted in the Leuggern borehole.  
Nagra Technical Report Series NTB 89-27, Nagra, Wetingen, Schweiz
- 13-13 **Cooper R B et al., 1997.** Monitoring methods for nuclear waste disposal. Atomic Energy of Canada Limited (AECL) – 11643

## Kapitel 14

- 14-1 **SKB, 1995.** Förstudie Storuman. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-2 **SKB, 1996.** Förstudie Malå. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-3 **SKB, 2000.** Förstudie i Östhammar. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-4 **SKB, 2000.** Förstudie i Nyköping. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB



- 14-5 **SKB, 2000.** Förstudie i Oskarshamn. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-6 **SKB, 2000.** Förstudie i Tierp. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-7 **SKB, 2000.** Förstudie i Hultsfred. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-8 **SKB, 2000.** Förstudie i Älvkarleby. Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-9 **SKB, 2000.** Systemanalys – Omhändertagande av använt kärnbränsle enligt  
KBS-3-metoden.  
SKB R-00-29, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-10 **SKI, 1999.** SKIs utvärdering av SKBs FUD-program 98. Sammanfattning och  
slutsatser.  
SKI Rapport 99:15, Statens kärnkraftinspektion
- 14-11 **SKI, 1999.** SKI:s utvärdering av SKB:s FUD-program 98. Gransknings-PM  
SKI Rapport 99:16, Statens kärnkraftinspektion
- 14-12 **SKB, 1998.** FUD-program 98. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.  
Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och  
geologisk djupförvaring.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-13 **SKB, 1998.** Underlagsrapport till FUD-program 98. Detaljerat program för  
forskning och utveckling 1999–2004.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-14 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter  
förslutning. Huvudrapport, Del I och II.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-15 **SKB, 1999.** SR 97. Processer i förvarets utveckling. Underlagsrapport till SR 97.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-16 **Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-E, Ericsson L O, 2000.** Vilka  
krav ställer djupförvaret på berget? Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och  
kriterier för lokalisering och platsutvärdering.  
SKB R-00-15, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-17 **SKB, 2000.** Geovetenskapligt inriktat program för undersökning och utvärdering  
av platser för djupförvaret.  
SKB R-00-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-18 **Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle  
SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-19 **SKB, 1994.** FUD-program 92 – Kompletterande redovisning. Kärnkraftavfallets  
behandling och slutförvaring. Komplettering till 1992 års program sammanställd  
med anledning av regeringsbeslut 1993-12-16.  
Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-20 **SKB, 1992.** Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport.  
Svensk Kärnbränslehantering AB

- 14-21 **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
- 14-22 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle.  
SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-23 **Sandstedt H, Munier R, Pers K, 2001.** Project Jade. Comparison of repository systems.  
SKB TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-24 **Birgersson L, Pers K, Wiborgh M, 2001.** Project Jade. Long-term and safety comparison of repository systems.  
SKB TR-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-25 **Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997.** ZEDEX – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring.  
SKB TR 97-30, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-26 **Pettersson S, Sjöblom R, Kalbantner P, 2000.** Retrieval in a KBS-3 type repository – ongoing work.  
Proceeding of the waste management symposium 2000, Tuscon, USA
- 14-27 **Larsson H, Kenne A, Edelsvärd C, 1997.** Främmande material i djupförvaret. Tillförsel och fördelning i deponeringsområdena för kapslar.  
SKB PR D-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-28 **Jones C, Christiansson Å, Wiborgh M, 1999.** Främmande material i ett djupförvar för använt kärnbränsle.  
SKB R-99-72, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 14-29 **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
- 14-30 **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
- 14-31 **IAEA, 1998.** SAGOR. Reference Volume for Safeguards for the Final Disposal of Spent Fuel in Geologic Repositories (SAGOR Activities).  
Report K/NSP-659

## Kapitel 15

- 15-1 **Werme L, 1988.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle  
SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998
- 15-2 **SKB, 2000.** Systemanalys. Omhändertagande av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden.  
SKB R-00-29, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-3 **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

- 15-4 **Andersson C-G, 1998.** Provtillverkning av kopparkapslar med gjutna insatser. Lägerrapport augusti 1998. SKB R-98-09, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-5 **Andersson C-G, 2001.** Utveckling av tillverkningsteknik för kopparkapslar med gjutna insatser Lägerrapport i augusti 2001. SKB R-01-39, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-6 **Andersson C-G, 1997.** Utformning av en produktionsenhet för tillverkning av kapslar för slutförvaring av använt kärnbränsle, version 1. SKB PR 97-03, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-7 **Andersson C-G, Andrews R E, 1999.** Fabrication of Containment Canisters for Nuclear Waste by Friction Stir Welding. In: Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Symposium on Friction Stir Welding, 14–16 June 1999 Rockwell Science Center, Thousand Oaks, California, USA
- 15-8 **Andersson C-G, Andrews R E, Dance B G I, Russel M J, Olden E J, Sanderson R M, 2000.** A Comparison of Copper Canister Fabrication by the Electron Beam and Friction Stir Processes. In: Proc. of the 2nd Int. Symposium on Friction Stir Welding, 26–28 June, Gothenburg, Sweden
- 15-9 **Andersson C-G, Andrews R E, 2001.** The Development of Advanced Welding Techniques for Sealing Nuclear Waste Canisters. In: Proc. of the 2001, MRS Spring Meeting, April 16–20, San Fransisco, USA
- 15-10 **ENIQ.** European Network for Inspection Qualification. Recommended Practice 2: Recommended Contents For Technical Justification.
- 15-11 **ENIQ.** European Network for Inspection Qualification. Recommended Practice 4: Recommended Contents For The Qualification Dossier.
- 15-12 **SKB, 1998.** Systemredovisning av djupförvaring enligt KBS-3 metoden. SKB R-98-10, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-13 **Havel R, 2000.** Jämförelse av alternativa lokaliseringar för inkapslingsanläggningen. SKB R-00-49, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-14 **Havel R, 2000.** FRINK Projektrapport – Inkapslingsanläggning placerad vid djupförvaret. SKB R-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 15-15 **Gillin K, 1998.** Säkerheten vid drift av inkapslingsanläggningen. SKB R-98-12, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Kapitel 16

- 16-1 **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt bränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-2 **Enarsson Å, Landgren A, Liljenzin J-O, Skålberg M, Spjuth Å, Gudowski W, Wallenius J, 1998.** Partitioning and transmutation (P&T) 1997. Status report. SKB TR-98-14, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 16-3 **US DOE, 2001.** A roadmap for developing accelerator transmutation of waste (ATW) technology. A report to the congress, DOE/RW-0519, October
- 16-4 The European Technical Working Group on ADS: A European roadmap for developing accelerator driven systems (ADS) for nuclear waste incineration. April 2001.
- 16-5 **Landgren A, 1999.** The use of aliquat-336 in a partitioning and transmutation process and a kinetic study of the oxidation of U(IV) to U(VI). Doktorsavhandling vid Chalmers Tekniska Högskola, Inst för Kärnkemi
- 16-6 **Spjuth L, 1999.** Solvent extraction studies with substituted malonamides and oligopyridines. Doktorsavhandling vid Chalmers Tekniska Högskola, Inst. För Kärnkemi
- 16-7 **Ekberg C, Enarsson Å, Gustavsson C, Landgren A, Liljenzin J-O, Spjuth L, 2000.** Partitioning and transmutation. Annual report 1999. SKB R-00-26, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-8 **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
- 16-9 **Gudowski W et al., 2000.** Nuc. Sci & Eng. 1366, November
- 16-10 **Wallenius et al., 2001.** Nuc. Sci & Eng. 137, January
- 16-11 **Tucek K et al.** A sub-critical transuranium burner with zero void worth and low reactivity losses. To be submitted to Nuclear Instruments and Methods in Physical Reserach
- 16-12 **Tucek K et al., 2000.** Optimal distribution of fuel, poisons and diluents in sub-critical cores dedicated to waste transmutation. Proc. Int Conf. On Emerging Nuclear Ewnergy Systems, ICENES 00, Petten
- 16-13 **Eriksson et al.** Preliminary safety analysis of a Swedish accelerator driven system employing nitride fuel and burnable absorbers. IAEA Technical Commiatte Meeting on "Core physics and enginnering aspects of emerging nuclear energy systems for energy generation and transmutation", 28 November to 1 December 2000, Argonne National Laboratory
- 16-14 **Wallenius et al., 2001.** In Proc 6<sup>th</sup>. Int. Information exchange meeting on P&T of actinides and fission products, Madrid, December 2000. OECD/NEA
- 16-15 **Gudowski W, Wallenius J, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Tucek K, 1999.** System and safety studies of accelerator driven transmutation systems. Annual report 1999. SKB R-00-27, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-16 **Gudowski W, Wallenius J, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Tucek K, 2001.** System and safety studies of accelerator driven transmutation systems. Annual report 2000 SKB R-01-22, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-17 **Ataç A, Blomgren J, Johansson C, Klug J, Olsson N, Renberg P-U, 2000.** Nuclear data for accelerator-driven transmutation. Annual Report 1999/2000. SKB R-00-40, Svensk Kärnbränslehantering AB

- 16-18 **SKB, 1992.** Projekt alternativstudier för slutförvar (PASS). Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-19 **Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Lejon B, Beswick J, 1998.** The very deep hole concept. Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 16-20 **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

## Kapitel 17

- 17-1 **Hedin G, Torstenfelt B, Carlsson J, 2000.** Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk. SKB R-00-18, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 17-2 **Hedin G, 2000.** Studie av rivningslogik för nukleära anläggningar i Sverige. SP 00-129, rev 0, Westinghouse Atom AB

## Kapitel 18

- 18-1 **SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 18-2 **Skagius K, Lindgren M, Pers K, 1999.** Gas generation in SFL 3-5 and effects on radionuclide release. SKB R-99-16, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 18-3 **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport, Del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB
- 18-4 **Chapman N, Apted M, Glasser F, Kessler J, Voss C, 2000.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall i Sverige. En internationell expertgranskning av SKB:s preliminära säkerhetsanalys. SKI Rapport 00:54, Statens kärnkraftinspektion
- 18-5 **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
- 18-6 **Pavasars I, 1999.** Characterisation of organic substances in waste materials under alkaline conditions. Doctoral Thesis at the Dept of Water and Environmental Studies, University of Linköping, ISBN 91-7219-485-5
- 18-7 **Holgersson S, 2000.** Studies on the effect of concrete on the chemistry in a repository for radioactive waste. Doctoral Thesis at the Dept of Nuclear Chemistry, Chalmers Technical University, ISBN 91-7197-955-7

- 18-8 **Trägårdh J, Lagerblad B, 1998.** Leaching of 90-year old concrete in contact with stagnant water.  
SKB TR-98-11, Svensk Kärnbränslehantering AB
- 18-9 **Smellie J A T (ed.), 1998.** Maqarin natural analoge study: Phase III.  
SKB TR-98-04, Svensk Kärnbränslehantering AB

## Förkortningar

3DEC	Datorkod för beräkningar i samband med jordskalv
AAA	Advanced Accelerator Application
ABACUS	Datorkod för hållfashetsberäkningar
Aberg	Hypotetisk försvarsplats i SR 97, data från Äspö i Småland
ACL	Aktivt CentralLaboratorium, Studsvik
ADS	Accelerator Driven System (transmutation)
ADTF	Accelerator Driven Test Facility
AEA	AEA Technology, Storbritannien
AECL	Atomic Energy of Canada Limited, Kanada
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ANDRA	Agence National Pour la Gestion des Dechets Radioactifs, Frankrike
ATW	Accelerator-driven transmutation
BARRA	ENRESA-projekt
Beberg	Hypotetisk försvarsplats i SR 97, data från Finnsjön i Uppland
BENCHPAR	Benchmark tests and guidance on coupled processes for performance assessment of nuclear waste repositories, EU-projektet
BET	Metod för att mäta ytor (Brown, Emmet, Teller)
BGS	Brittish Geological Survey, Storbritannien
BIOMASS	IAEA-projekt
BIOMOVS	Biospheric model validation study, IAEA-projekt
BIOPATH	SKB:s beräkningsverktyg, för biosfären
BIPS	Borrhåls-TV
BMA	Bergsal för medelaktivt avfall i SFR 1
BMT	Buffer Mass Test, Stripa
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Tyskland
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
BWR	Boiling Water Reactor
CAD	Computer Aided Design
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
Ceberg	Hypotetisk försvarsplats i SR 97, data från Gideå i Ångermanland
CHEMLAB	Mätsond för undersökningar i borrhål, Äspölaboratoriet
CHON	Kol-väte-syre-kväveföreningar
CLAB	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle
CODE-BRIGHT	Datorkod för termo-hydro-mekaniska beräkningar
COLLOID	Kolloidexperiment, Äspölaboratoriet
COMP23	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet
COMPASS	EU-projekt
CONFIRM	EU-projekt
CRIEPI	Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan
CRUD	Chalk River Unidentified Deposits, ytkontamination
CTH	Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg
DECOVALEX	Mathematical Models of Coupled THM Processes for Nuclear Waste Repositories
DUL	Definitivt underlag (projektering)
EBS	Engineered Barrier System, tekniska barriärer

EBW	Electron Beam Welding
ECOCLAY	Effect of cement water on clay barrier performance, EU-projekt
EDF	Ekosystemdosfaktor
ENIQ	European Network for Inspeccion Qualification
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Spanien
EQUIP	Evidences from quarternary infillings for palaeohydrology, EU-projekt
EU	Europeiska Unionen
FA 17x17	Typ av PWR-bränsle
FARF31	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet
FASSET	Framework for Assessment of Environmental Impact, EU-projekt
FCC	Fracture Classification and Characterization Project, Äspölaboratoriet
FEBEX	Full-scale High Level Waste Engineered Barriers Experiment, Grimsel, Schweiz
FEP	Feature, Events and Processes
FLAC3D	Datorkod för beräkningar i samband med jordskalv
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut, Umeå
FoU	Forskning och Utveckling
FSW	Friction Stir Welding
FUD	Forskning, Utveckling och Demonstration
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GAMBIT	Gas Migration in Bentonite
GEHYC	Ingår i DarcyTools
GIS	Geografiskt informationssystem
GPS	Global Positioning System
GRS	Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Tyskland
HINDRAS	EU-projekt
HMC	Hydro-mekanisk-kemisk
HMS	Hydro Monitoring System
HPF	High Permeability Features, Äspölaboratoriet
HPF	Hyperalkaline Plume in Fractured Rocks, Grimsel, Schweiz
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
HRL	Hard Rock Laboratory
HYDRASTAR	SKB:s datorkod för hydrologiberäkningar
IAEA	International Atomic Energy Agency, FN:s internationella atomenergiorgan
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer
ICRP	International Commission on Radiological Protection, den internationella strålskyddskommissionen
IJC	International Joint Committee
IPLU	Inledande platsundersökning
IRPA	International Radiation Protection Association
IRT	International review group, SR 97
ISA	Isosackarinsyra
ISO 9001	Internationell kvalitetsstandard
ISTC	International Science and Technology Center
ITU	Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe
JADE	SKB-projekt, Jämförelse Av Deponeringsmetoder
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan
KASAM	Statens råd för kärnavfallsfrågor
KBS	Kärnbränslesäkerhet
KBS-3 H	Variant av KBS-3, horisontell deponering med en kapsel i varje deponeringshåll



KBS-3 MLH	Variant av KBS-3, horisontell deponering med flera kapslar efter varandra i medellånga deponeringshål
KBS-3 V	Referensvariant av KBS-3, vertikal deponering med en kapsel i varje deponeringshål
Kr-BET	Metod för att mäta ytor genom adsorption av krypton
KRISTALLIN-I	Schweizisk säkerhetsanalys, 1994
KSU	Kärnkraftens Säkerhet och Utbildning
KTH	Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
LANL	Los Alamos National Laboratory, USA
LOT	Long Term Test of Buffer Material, Äspölaboratoriet
LPT-2	Long Term Pumping Test, Äspölaboratoriet
LTDE	Long Term Diffusion Experiment, Äspölaboratoriet
LWR	Light Water Reaktor, lättvattenreaktor
M3	Mixing an Mass balance Modelling, hydrokemisk modell
MATLAB	Datorkod för matematiska kalkyler
MATRIX	Matrisvattenexperiment, Äspölaboratoriet
MBA	Material Balance Area
MEGAPIE	EU-projekt
MICROBE	Mikrobiella experiment, Äspölaboratoriet
MISTRA	Stiftelsen för miljöstrategisk forskning
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning
MONITOR 2000	SKB:s användargränssnitt för hydrologiberäkningar och beräkningar av radionuklidtransport
MOX	Mixed oxide fuel
MUSE	EU-projekt
MX-80	Na-bentonit av Wyoming-typ, referensmaterial för bufferten
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz
NAMMU	Numerisk datormodell, hydrologi
NEA	Nuclear Energy Agency, Paris
NEWPART	EU-projekt
NKS	Nordiskt kärnsäkerhetssamarbete
NUCTRAN	SKB:s datorkod för beräkning av radionuklidtransport i närområdet
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris
OFP	Oförstörande provning
ORIGEN	Datorkod för beräkning av resteffekt, radionuklidinnehåll, alfa-, beta-, gamma- och neutronkällstyrkor i använt kärnbränsle
P&T	Partitioning and Transmutation
PAGEPA	Paleohydrogeology and Geoforecasting for Performance Assessment, EU-projekt
PARTNEW	EU-projekt
PASS	SKB-projekt, Projekt AlternativStudier för Slutförvar
PGF	Post-Glacial Faulting,
PLU	Platsundersökning
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japan
PRISM	Datorkod för probabilistiska beräkningar för biosfären
PROPER	SKB:s datorkodpaket för hantering av probabilistiska hydroberäkningar och beräkningar av radionuklidtransport
PSI	Paul Scherrer Institute, Schweiz
PWR	Pressurized Water Reactor
R1	Forskningsreaktor på Drottning Kristinas väg i Stockholm
R2	Forskningsreaktor i Studsvik
REDOX	Large scale redox experiment, Äspölaboratoriet

REE	Rare Earth Element
REX	Redox experiment in detailed scale, Äspölaboratoriet
RVS	Rock Visualisation System
S&T	Separation and Transmutation
SAFE	SKB-projekt, förnyad säkerhetsredovisning för slutförvaret för driftavfall i Forsmark
Sandia	Sandia National Laboratories, New Mexico, USA
SC	Stochastic Continuum
SCE	Standard Calomel Electrode
SEM-EDS	Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive
SFL 3-5	Slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall
SFR	Slutförvar för radioaktivt driftavfall vid Forsmark
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning
SICADA	SKB:s databasprogram för undersökningsdata
SIMFUEL	Synthetic uranium dioxide polycrystalline material
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SKB91	SKB:s säkerhetsanalys, 1992
SKI	Statens kärnkraftinspektion
SLU	Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala
SMHI	Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut
SPIRE	EU-projekt
SR 97	SKB-projekt, säkerheten efter förslutning av djupförvaret, 1999
SSI	Statens strålskyddsinstitut
SVEA 96	Typ av BWR-bränsle
SVEA-64	Typ av BWR-bränsle
SWECLIM	MISTRA-projekt, Swedish regional climate modelling programme
TAG	Co-operativt program för utbyte av vetenskaplig och teknisk information mellan pågående rivningsprojekt
TBM	Tunnel Boring Machine
TECLA	EU-projekt
TEF	Technical Evaluation Forums
THM	Termo-hydro-mekanisk
THMC	Termo-hydro-mekanisk-kemisk
TRUE	Tracer Retention Understanding Experiments, Äspölaboratoriet
TSL	The Svedberg-Laboratory, Uppsala
TWI	The Welding Institute, Cambridge, England
TVO-92	Finsk säkerhetsanalys, 1992
UDEC	Datorkod för beräkningar i samband med jordskalv
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
URL	Underground Rock Laboratory
USDOE	United States Department of Energy, USA
USDOE/CBFO	United States Department of Energy, Carlsbad Area Office, USA
WAVE	Datorkod för beräkningar i samband med jordskalv
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant, New Mexico, USA
VSP	Vertical Seismic Profiling
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
ZEDEX	Zone of excavation disturbance experiment, Äspölaboratoriet
$\alpha$	Alfastrålning
$\beta$	Betastrålning
$\gamma$	Gammastrålning