

**Detaljerat program  
för forskning och utveckling  
1999–2004**

September 1998

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Box 5864

102 40 Stockholm

Tel 08-459 84 00

Fax 08-661 57 19



**Detaljerat program  
för forskning och utveckling  
1999–2004**

# Innehåll

	Sida	
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Metoder för säkerhetsanalys</b>	<b>5</b>
2.1	Inledning	5
2.1.1	Osäkerheter	6
2.1.2	Scenarier, varianter	7
2.1.3	Fyra moment	8
2.2	Systembeskrivning	8
2.2.1	Mål och program	9
2.3	Metod för val och formulering av scenarier	9
2.3.1	Mål och program	12
2.4	Hantering av osäkerheter	12
2.4.1	Mål och program	12
2.5	Var återfinns säkerhetsanalysens processer i forskningsprogrammet?	14
<b>3</b>	<b>Modeller för säkerhetsanalys</b>	<b>19</b>
3.1	Hantering av kopplade modeller	19
3.1.1	Mål och program	19
3.2	Modeller för radionuklidinventarium och resteffekt	19
3.2.1	Mål och program	19
3.3	Modeller för bränsleupplösning/omvandling	20
3.3.1	Allmänt om bränsleupplösningssmodeller	20
3.3.2	Löslighetsbegränsad modell	20
3.3.3	Modell med radiolytisk oxidation	20
3.3.4	Modell med omedelbar upplösning	22
3.3.5	Mål och program	23
3.4	Kemisk modellering i närområdet	24
3.4.1	Mål och program	25
3.5	Modellering av skadad kapsels utveckling	25
3.5.1	Mål och program	26
3.6	Modeller för radionuklidtransport m m i närområdet	26
3.6.1	Mål och program	27
3.7	Modeller för grundvattenflöde och radionuklidtransport i fjärrområdet	28
3.7.1	Mål och program	29
3.8	Modeller för radionuklidens spridning i biosfären	30
3.8.1	Förståelse och konceptuella modeller	31
3.8.2	Måluppfyllelse i FUD 95	32
3.8.3	Mål och program för det fortsatta arbetet	32
3.9	Kvalitetssäkring, datormodeller och beräkningar	33
3.9.1	Mål och program	34
<b>4</b>	<b>Använt bränsle</b>	<b>35</b>
4.1	Korrosion av använt kärnbränsle – analysmetoder	35
4.2	Matrisupplösning	37
4.3	Radiolys	39
4.4	Modeller för bränsleupplösning	41
4.5	Naturliga analogier	42

	Sida
4.6	Mål och program 43
4.6.1	Löslighetsbegränsningar/upplösningskinetik 43
4.6.2	Radiolys 43
4.6.3	Redoxbetingelser i närområdet och redoxkinetik 44
4.6.4	Löslighetsundersökningar av fyrvärda aktinider 44
4.6.5	Modeller för bränsleupplösning 44
4.6.6	Modellvalidering genom naturliga analogier 45
4.7	Kompetenshållning 45
4.7.1	Studsviks laboratorium HCL 45
4.7.2	Kärnkemi 45
<b>5</b>	<b>Kapselmaterial 47</b>
5.1	Korrosionsprovning, koppar 47
5.2	Korrosionsprovning, gjutjärn 47
5.3	Materialprovning 48
5.4	Oförstörande provning 48
<b>6</b>	<b>Buffert och återfyllning 49</b>
6.1	Funktionskrav 49
6.1.1	Krav på buffertfunktioner 49
6.1.2	Buffertegenskaper som ger önskad funktion 49
6.1.3	Krav på återfyllningsfunktioner 51
6.1.4	Krav på närberget för byggbarhet 52
6.2	Vunna kunskaper under den gångna FUD-perioden 52
6.2.1	Grundläggande kunskap 52
6.2.2	Teknikutveckling 53
6.2.3	Samverkan med omgivning 53
6.2.4	Funktion i djupförvar 54
6.2.5	Val av och tillgång till buffertmaterial 54
6.3	Beräkningsmodeller 55
6.4	Transportprocesser 55
6.4.1	Hydrauliska processer 55
6.4.2	Jondiffusion 56
6.4.3	Gasflöde 56
6.5	Betong 57
6.6	Mål och program 57
6.6.1	Frågeställningar som utretts i huvudsak 57
6.6.2	Kvarstående frågeställningar 58
<b>7</b>	<b>Strukturgeologi och bergets mekaniska stabilitet 61</b>
7.1	Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar 61
7.2	Urbergets mekaniska egenskaper 62
7.3	Geodynamiska och mekaniska processer 63
7.4	Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 95 65
7.5	Mål och program 67
7.5.1	Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar 67
7.5.2	Urbergets mekaniska egenskaper 68
7.5.3	Geodynamiska och mekaniska processer 68
7.6	Bergmekaniska modeller 69

		Sida
<b>8</b>	<b>Vattenflöde i berg</b>	<b>73</b>
8.1	Grundvattenflöde och advektion	73
8.2	Karakterisering av sprickor med hänsyn till flöde, advektion och retention	74
8.3	Mål och program	74
<b>9</b>	<b>Grundvattenkemi</b>	<b>77</b>
9.1	Grundvattnets kemiska sammansättning i Sverige	77
9.2	Grundvattentyper och deras ursprung på Åspö	79
9.3	Viktiga fysikaliska processer	85
9.3.1	Blandning	85
9.3.2	Diffusion	85
9.3.3	Gasbildning	86
9.4	Viktiga processer i samverkan grundvatten-mineral	86
9.4.1	pH-utveckling	87
9.4.2	Redox-utveckling	88
9.4.3	Mikrobiella processer	89
9.4.4	Kolloidbildning	90
9.4.5	Upplösning och utfällning av sprickmineral	90
9.5	Grundvattenkemisk provtagning och analys	91
9.6	Mål och program	92
9.7	Hydrokemiska modellverktyg	94
9.7.1	Koncept	94
9.7.2	Metod	94
9.7.3	Fortsatt utveckling	95
<b>10</b>	<b>Kemi</b>	<b>97</b>
10.1	Radionuklidkemi	97
10.2	Sorption och diffusion	98
10.3	Kolloider	99
10.4	Organiska ämnen	99
10.5	Mikrober	100
10.6	Valideringsexperiment	101
10.7	Miljöfarliga ämnen	101
10.8	Mål och program	101
10.9	Kompetensutveckling	102
<b>11</b>	<b>Biosfären</b>	<b>103</b>
11.1	Förståelse och konceptuella modeller	103
11.2	Modellutveckling	104
11.3	Transportprocesser	105
11.4	Skogsekosystemet	105
11.5	Sediment	105
11.6	Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt	106
11.7	Internationellt arbete	106
11.8	Måluppfyllelse av FUD 95	107

		Sida
11.9	Mål och program för det fortsatta arbetet	107
11.9.1	Processororienterade konceptuella modeller	108
11.9.2	Transportprocesser	108
11.9.3	Skogsekosystem	109
11.9.4	Sediment	109
11.9.5	Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt	110
11.9.6	Modellutveckling	110
11.9.7	Internationellt arbete	110
11.10	Kompetensutveckling	111
<b>12</b>	<b>Annat långlivat avfall</b>	<b>113</b>
12.1	Låg- och medelaktivt avfall till SFL	113
12.2	Förvarsutformning och layout	114
12.3	Funktion och säkerhet	116
12.4	Laboratorieundersökningar	117
12.5	Mål och program	118
12.6	Kompetensutveckling	119
<b>13</b>	<b>Alternativa metoder</b>	<b>121</b>
13.1	Separation och transmutation	121
13.1.1	Bakgrund	121
13.1.2	Kunskapsläge	122
13.1.3	Svenska arbeten	124
13.1.4	Bedömning av framtiden för separation och transmutation	126
13.1.5	Program för perioden 1999–2004	127
13.2	Deponering i djupa borrhål	128
13.2.1	Geovetenskapliga förutsättningar	128
13.2.2	Mål och program	130
<b>14</b>	<b>Äspölaboratoriet</b>	<b>131</b>
14.1	Inledning	131
14.2	Mål	133
14.3	Genomförda projekt	134
14.3.1	Verifiering av förundersökningsmetoder	134
14.3.2	Fastställande av detaljundersökningsmetodik	135
14.3.3	Test av modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion	139
14.4	Resultat från pågående projekt och forskningsprogram 1999–2004	141
14.4.1	Genomförande och organisation	141
14.4.2	Basforskning vid Äspölaboratoriet	142
14.4.3	Fastställa detaljundersökningsmetodik	145
14.4.4	Test av modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion	147
14.4.5	Demonstration av teknik för och funktion hos viktiga delar i förvarssystemet	157
14.5	Information	167
14.6	Internationellt deltagande	168
<b>15</b>	<b>Naturliga analogier</b>	<b>169</b>
15.1	Naturliga analogier och säkerhetsanalys	169
15.2	Jordanien	170
15.3	Oklo	171
15.4	Palmottu	173

15.5	Mål och program	Sida 173
15.5.1	Okloprojektets mål	173
15.5.2	Palmottuprojektets mål	174
15.5.3	Maqarin, Oklo och Palmottu	174
15.6	Kompetensuppbyggnad	174
15.7	Övrigt	175
<b>16</b>	<b>Paleohydrogeologiskt program</b>	<b>177</b>
16.1	Programmets mål	177
16.2	Modellering av glaciationer och deras påverkan på geosfären	177
16.3	Hydrogeologiska och hydrokemiska aspekter	179
16.4	Mekaniska aspekter	179
16.5	Kopplade effekter av glaciationer	180
16.6	Projekt EQUIP	181
16.7	Projekt PAGEPA	181
<b>17</b>	<b>Djupborrning i Laxemar</b>	<b>183</b>
17.1	Lägesredovisning	183
17.2	Mål och program	184
<b>18</b>	<b>Vetenskapsinformation</b>	<b>185</b>
18.1	Riskprojektet	185
18.2	Funktionen för vetenskapsinformation	185
18.3	Internet	186
18.4	Intern utbildning	186
	<b>Referenser</b>	<b>187</b>

# 1 Inledning

Den här rapporten är ett underlag till FUD-program 98 /1-1/. Rapporten redogör för större delen av den forskning och utveckling som SKB bedriver. Kunskapsläget beskrivs liksom de mål och program som styr det fortsatta arbetet. Det vi närmast överblickar är de kommande tre åren 1999–2001. Angivelser för de tre därpå följande åren är av naturliga skäl mindre detaljerade och ger snarast en inriktning.

De inledande kapitlen (kapitel 2 och 3) redogör för utvecklingen av säkerhetsanalysen, de metoder och modeller som används för att analysera den långsiktiga säkerheten. Därefter följer ett antal kapitel (kapitel 4 till och med 17) som redogör för den FoU vars främsta uppgift det är att stödja säkerhetsanalysen. Detta är dock inte den enda uppgiften. Till detta kommer även en viss teknisk utveckling av djupförvaret och dess komponenter (se t ex kapitel 6 och 14), samt prövning av alternativa metoder som t ex separation och transmutation (kapitel 13). Metoder för undersökningar och utvärderingar av platser för djupförvaret är också något som prövas och utvecklas vidare, med inriktning på att börja en platsundersökning tidigast år 2001 (se t ex kapitel 7, 8, 9, 11 och 14).

En stor del av SKB:s forskning, utveckling och demonstration bedrivs i form av projekt. Flertalet av projekten har internationell medverkan. Äspölaboratoriet är ett framstående exempel på detta. En betydande del av SKB:s projektinriktade FoU är koncentrerad till Äspölaboratoriet. En viktig uppgift för Äspölaboratoriet är att pröva och demonstrera delar av förvarssystemet i full skala.

Sist ingår ett kapitel om vetenskapsinformation (kapitel 18). Vi vill förmedla de vetenskapliga resultat som tas fram till allmänhet och beslutsfattare med förhoppning om att därigenom få acceptans för ett djupförvar.

Det är säkerhetsanalysens uppgift att utveckla och förvalta de metoder och modeller för beräkningar som säkerhetsanalysen använder (kapitel 2 och 3). De ämnesområdesvisa programmen (kapitel 4 till och med 11) svarar för utveckling av förståelsen av de processer som behandlas i säkerhetsanalysen, att utveckla och pröva alternativa modeller samt att sammanställa dataunderlag för säkerhetsanalysen. De barriärer som skyddar människan och miljön från radionukliderna i avfallet är utgångspunkten för den ämnesområdesvisa uppdelningen av programmen.

## **Avfallet**

Kärnkraften producerar el och ger samtidigt upphov till radioaktivt avfall i form av drifts-avfall och använt kärnbränsle. Radioaktivt avfall uppstår även då kärnkraftverk rivs, s k rivningsavfall. Men de flesta radionuklider som alstras lämnar aldrig bränslet i reaktorn och en stor del av radioaktiviteten i använt kärnbränsle avklingar under mellanlagringen, först på verken och sedan i CLAB.

Kärnbränsle är ett keramiskt material uppbyggt av urandioxid som är svårlösligt och radionukliderna sitter, sånär som på en mindre fraktion, inne i materialet. Använt kärnbränsle är en bra avfallsform, även i jämförelse med andra alternativ. Därför är det onödigt att omvandla använt kärnbränsle till någon annan fast avfallsform, t ex förglasat



högaktivt avfall – såvida man inte gör detta för att samtidigt utvinna något av innehållet. Vid uppberedning utvinns återstoden av klyvbart material ur använt kärnbränsle men får samtidigt ett högaktivt avfall i form av en lösning som behöver omvandlas till fast avfall igen, genom t ex förglasning.

För att undersöka det använda bränslets egenskaper som avfall i ett djupförvar och vad som händer om det kommer i kontakt med grundvattnet så genomförs olika laboratorieförsök (kapitel 4). Resultaten från experimenten, t ex i form av beskrivningar, mätvärden och beräkningsmodeller, används som underlag till analysen av den långsiktiga säkerheten (kapitel 3). Vad som skulle hända om en kapsel, mot förmodan, inte förmår hålla grundvattnet isolerat från avfallet är väsentligt att belysa i säkerhetsanalysen.

Det låg- och medelaktiva avfall som uppstår i samband med drift av kärnkraftverken går till SFR i Forsmark. SFR är en anläggning i drift. Där deponeras även radioaktivt avfall från forskning, medicin, industri etc. SFR avhandlas inte i denna rapport, men resultat från SKB:s FoU används även för att övervaka den långsiktiga säkerheten i SFR.

En typ av låg- och medelaktivt avfall som behandlas i den här rapporten är långlivat låg- och medelaktivt avfall (kapitel 12). Detta avfall består främst av de inre delarna från reaktorerna, som byts ut i samband med underhåll eller rivning, samt en del avfall från forskningen. Forskningsavfallet samlas in, behandlas och mellanlagras i Studsvik.

### ***Kapsel och buffert***

Kapseln av koppar och gjutjärn är en väsentlig barriär i djupförvaret för använt kärnbränsle. Utvecklingen av kapseln och studier av dess material har bedrivits inom ramen för inkapslingsprojektet /1-2/. Förslutning och provning av kapseln kommer att utvecklas vid Kapsellaboratoriet /1-1/. Studier av kapselmateriäl behandlas emellertid i den här rapporten (kapitel 5).

En buffert av bentonit skall omge kapseln och fylla utrymmet mellan kapseln och berget i deponeringshålet. Buffertens uppgift är att mekaniskt och kemiskt skydda kapseln. Samtidigt som den skall ha låg hydraulisk ledningsförmåga så skall den även ha en viss genomsläpplighet om det t ex skulle bildas gas i kapseln. Den värme som bildas skall ledas bort så att temperaturen inte blir för hög. En för hög temperatur kan t ex äventyra bentonitens stabilitet. Utöver att skydda kapseln så är bufferten även den tredje barriären mot spridning av radionuklider – efter kapseln och det använda kärnbränslet (avfallet). Skulle kapseln skadas, vatten tränga in och laka ut radionuklider ur bränsleelementen så fördröjer bufferten uttransporten av radionukliderna. Det är en viktig funktion och flera radionuklider avklingar helt eller reduceras kraftigt innan de hunnit tränga genom bufferten.

### ***Berget som barriär***

Det är några centrala egenskaper hos berggrunden som utnyttjas för att säkerställa djupförvarets funktion och långsiktiga radiologiska säkerhet:

- en mekanisk stabilitet för lång framtid,
- en kemiskt stabil miljö med ett grundvatten som ej bidrar till korrosion av kapselmaterialet eller omvandling av buffertmaterialet och som ger låg löslighet samt stor fördröjning av ämnena i avfallet,

- en långsam och så långt möjligt oförändrad grundvattenomsättning som begränsar transport av ämnen vilka kan påverka avfallsprodukterna och återfyllnadsmaterialet negativt samt begränsar transport av radioaktiva ämnen.

Det finns uppenbarligen kopplingar mellan dessa egenskaper. Förutom ovanstående centrala geovetenskapliga egenskaper är det väsentligt att minimera riskerna för ett framtida intrång genom att:

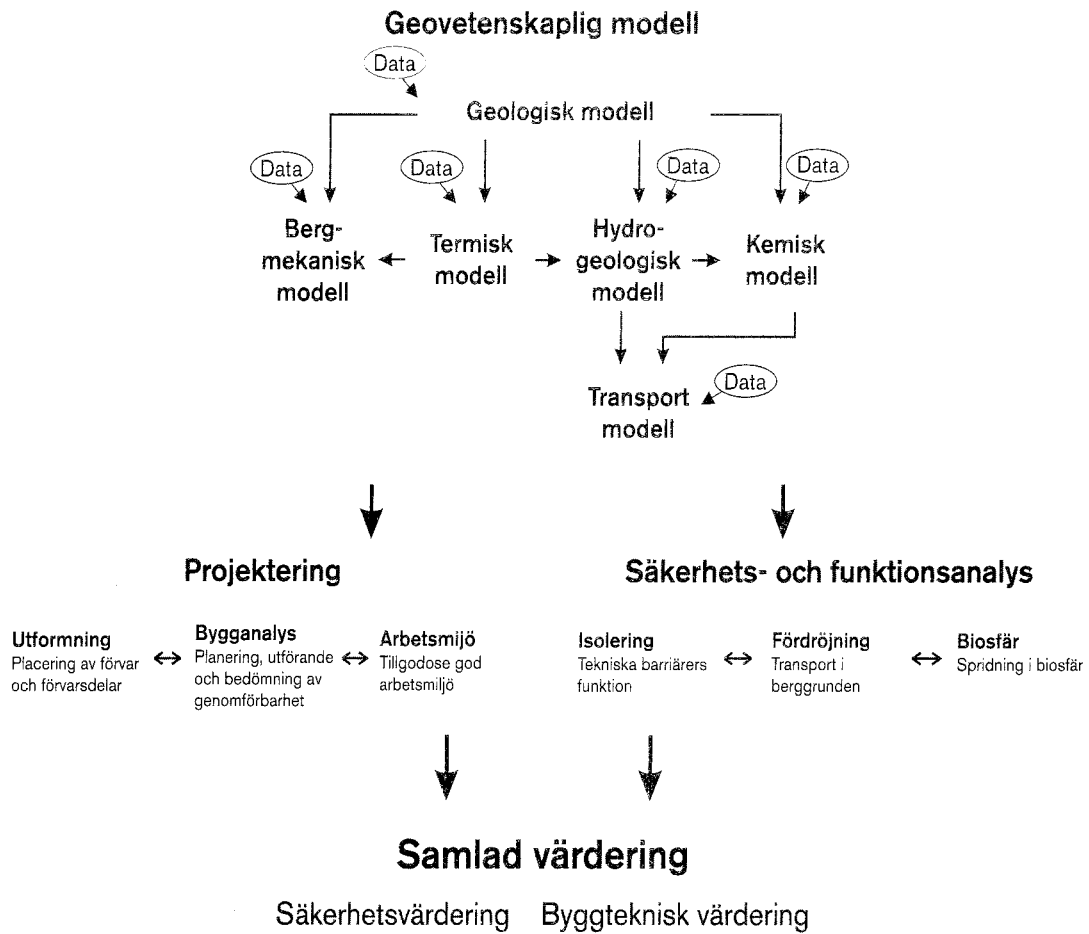
- undvika bergvolymmer eller undvika närhet till volymer med potential för exploateringsbara metaller och mineral, energilagring och energiutvinning,
- förlägga förvaret på en sådan plats och ett sådant djup att risken för intrång genom borrning (brunnar, prospektering, exploatering) blir mycket liten.

De geologiska aspekterna är huvudsakligen förknippade med förvarets funktion och säkerhet men är också av betydelse för själva byggandet av förvaret. Det föreligger en koppling mellan förvarets utformning, dess säkerhet och dess placering i berget. Denna koppling behöver dock inte vara sådan att konstruktionsmässiga svårigheter alltid innebär långsiktiga säkerhetsrisker. Exempelvis kan lerfyllda zoner vara en anläggningsteknisk svårighet men ej ett uppenbart problem för framtida radiologisk säkerhet. Figur 1-1 visar schematiskt hur geovetenskaplig information och data ämnesvis hanteras samt vilka modeller som tas fram med inriktning på långsiktig säkerhet, funktion och byggande.

### ***Biosfärens betydelse***

Biosfären är den del av jorden där de flesta organismer, djur, växter och människor lever. Biosfären utgörs av ekosystemen som finns i vattendragen, jordbruksområden, skog och städer samt de ytära jordlagren och grundvattenreservoarerna. Det är först i biosfären som ett eventuellt läckage av radioaktiva ämnen får betydelse och det är där effekterna, dvs dosen av radioaktiva ämnen mäts eller beräknas. Därför baseras en stor del av lagstiftningen på doser till människor i biosfären och de beräknade doserna, eller den risk doserna ger upphov till, används som ett jämförelsemått mellan olika förvarsalternativ eller platser. Till detta kommer att även de naturliga ekosystemen skall skyddas vilket kräver en beskrivning av effekterna på andra organismer än människan.

Det viktigaste är således att förhindra att radioaktiva ämnen når biosfären, men biosfären kan också ha barriäregenskaper genom att endera skadliga ämnen isoleras i otillgängliga delar av biosfären eller snabbt späds ut till låga halter så att konsekvenserna för människor och ekosystemen begränsas. Vid lokalisering är det därför viktigt att välja platser där dessa förutsättningar är uppfyllda en rimlig tidsperiod i framtiden. De största effekterna av ett djupförvar på biosfären är emellertid inte orsakade av radioaktivitet utan uppstår i och med byggnation och drift av förvaret. Därför undviks områden som är speciellt känsliga, t ex naturreservat och andra värdefulla biotoper.



*Figur 1-1. Områdesvis schematisk beskrivning av hur berggrundens data och information hanteras och modelleras med inriktning på säkerhet, funktion och byggande.*

## 2 Metoder för säkerhetsanalys

Under inledningen av den kommande treårsperioden kommer den nu pågående säkerhetsanalysen, SR 97, att slutföras. Utvecklingen av metoder och modeller kommer därefter att bygga på bland annat erfarenheterna från SR 97. Ett första naturligt steg i det vidare arbetet blir därför att genomföra utvärderingar av erfarenheterna från SR 97 inom olika delområden av säkerhetsanalysen. Modeller för olika delsystem kommer sedan att utnyttjas för utvärderingar under platsundersökningarna.

Därutöver kommer en analys att genomföras av det alternativa förvarskoncept som bygger på deponering i djupa hål. Omfattningen av denna analys blir betydligt mindre än den av SR 97. Detta kan utgöra ett lämpligt tillfälle att vid behov prova modifierad eller ny metodik för kommande säkerhetsanalyser.

### 2.1 Inledning

Här följer först en genomgång av några viktiga begrepp och moment i en säkerhetsanalys, som bakgrund till presentationerna av programmen för olika delområden.

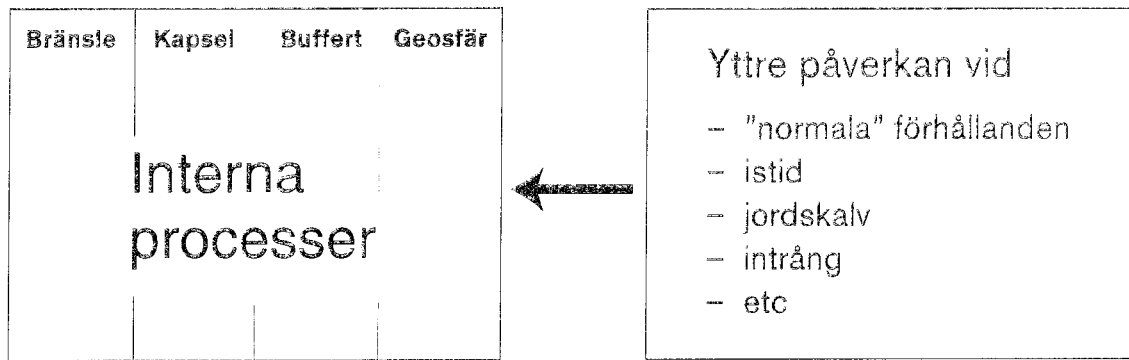
Med förvarssystemet menas i det följande djupförvaret med dess bränslefyllda kapslar, omgärdade av buffertlera i deponeringshål, de återfyllda tunnlarna samt berggrunden kring förvaret. Uppåt avgränsas förvarssystemet av gränsen mellan geosfär och biosfär. I en skarp diskussion kan en mer tydlig systemgräns behöva läggas fast. Inom förvarssystemet studeras olika händelseförlopp i detalj.

Förvarssystemet med alla dess ingående komponenter har, då förvaret just byggts, ett initialt tillstånd. Tillståndet kan beskrivas med en rad tillståndsvariabler, t ex geometriska mått för kapsel, deponeringshål och buffert, temperatur i olika delar av förvaret, radionuklidinnehållet i bränslet, grundvattnets halter av sulfid och kalium, bergspänningar etc. Tillståndsvariablerna karakteriserar förvaret termiskt, hydrauliskt, mekaniskt och kemiskt. Även förvarets fysiska struktur ryms i variablerna.

Med tiden ändras tillståndet hos förvaret av en rad processer, t ex radioaktivt sönderfall, värmetransport i buffert, grundvattenrörelser, korrosion av kopparkapseln etc.

Tillståndsvariabler och processer påverkar varandra i ett komplext nätverk. Processen kopparkorrosion påverkas bland annat av två tillståndsvariabler: halten av kopparkorrodanter i gränsskiktet mellan buffert och kapsel samt temperaturen. Halten av kopparkorrodanter bestäms i sin tur bland annat av transportprocessen diffusion i bufferten varigenom korrodanter transporteras från grundvattnet genom bufferten till kapselytan. Kopparkorrosionen leder i sin tur till en påverkan på kapselns geometri (tjocklek), en annan tillståndsvariabel. Tillståndsvariablerna förändras alltså med tiden av en rad parallella och kopplade processer.

Via processerna genomgår förvaret på detta sätt en utveckling i tiden. Utvecklingen påverkas även av växelverkan med omgivningen. Denna växelverkan kan vara kontinuerlig i tiden, t ex påverkan från klimatsystemet, eller ha karaktären av plötsliga händelser, t ex



*Figur 2-1. Föroret har ursprungligen ett initialt utseende eller tillstånd. Utvecklingen bestäms sedan av interna processer och påverkan från omgivningen.*

mänskliga intrång. Beskrivningen av dessa olika former av växelverkan med omgivningen kan kräva ingående analyser av de omgivande systemen. Se också Figur 2-1.

Säkerhetsanalysens uppgift är att beskriva förorets utveckling samt att påvisa de säkerhetsmässiga konsekvenserna av utvecklingen. Konsekvenserna skall i varje ögonblick kunna avläsas i tillståndsvariablerna, t ex integriteten hos kopparkapseln, eventuella halter av radionuklider i grundvattnet eller flöde av radionuklider från geosfär till biosfär.

För att beskriva utvecklingen krävs en strukturerad sammanställning av tillståndsvariabler och processer. En central del i metodiken för en säkerhetsanalys är därför att upprätta en sådan sk systembeskrivning. Beskrivningen skall kunna ligga till grund för såväl säkerhetsanalysens genomförande som rapportering. Kunskapsläge och utvecklingsprogram för systembeskrivningen presenteras i avsnitt 2.2.

### 2.1.1 Osäkerheter

I en säkerhetsanalys tvingas man ständigt hantera information som omgärdas av osäkerheter. Det gäller kvalitativa osäkerheter som uttrycks i frågorna:

- Är alla viktiga processer identifierade?
- Förstår vi mekanismerna och principerna bakom de olika processerna?
- Är strukturen i systembeskrivningen korrekt och valet av tillståndsvariabler adekvat?
- Hur väl förstår vi processerna och växelverkan med omgivningen kvalitativt?

Andra osäkerheter är kvantitativa:

- Hur förlöper processen? Även om mekanismen är väl förstådd kan nödvändiga data för den kvantitativa beskrivningen vara behäftade med osäkerheter. En aspekt av detta är den naturliga variabilitet som utmärker vissa data i en säkerhetsanalys.
- Hur väl kan vi kvantifiera initialtillståndet?
- Hur väl kan vi kvantifiera växelverkan med omgivningen?

Låt oss för ett ögonblick, för resonemangets skull, anta att vi visste allt om initialtillståndet, lyckats identifiera alla verk samma processer, förstod processerna kvalitativt och kände alla data för att kvantifiera dem samt att förvarets växelverkan med omgivningen idag och i framtiden vore känd. Då skulle vi kunna bygga en trogen matematisk modell av förvaret och i detalj förutsäga dess utveckling. Vi skulle kunna ge en enda tillförlitlig beskrivning av förvarets framtida utvecklingsväg.

Detta är naturligtvis inte möjligt. I stället måste vi på något sätt hantera alla de osäkerheter som alltid kommer att omgärda informationen en säkerhetsanalys bygger på. En hörnsten i en den hanteringen består i att studera ett antal alternativa utvecklingsvägar som tillsammans skall ge en rimlig täckning av vad som kan tänkas ske med förvaret i framtiden. Man talar om att man analyserar olika scenarier i en säkerhetsanalys.

### **2.1.2 Scenarier, varianter**

Först formulerar vi vad vi skulle kunna kalla för ett "troligt" eller " normalt " initialtillstånd: Förvaret antas vara byggt helt enligt specifikationerna, alla kopparkapslar är fullständigt täta osv. Låt oss vidare anta att växelverkan med förvarets omgivning ser ut ungefär som idag, vilket bland annat betyder att dagens klimat antas gälla framgent. Låt oss nu med dessa förutsättningar (detta initialtillstånd och denna växelverkan) studera förvarets utveckling och se vilka eventuella konsekvenser i form av t ex utsläpp av radionuklider det skulle kunna föra med sig. I studiet av utvecklingen skulle vi på ett eller annat sätt inkludera alla relevanta processer vi identifierat i systembeskrivningen. Detta blir vårt basscenario i analysen.

Andra förutsättningar vad gäller initialtillstånd och växelverkan ger andra utvecklingsvägar för förvaret och eventuellt andra konsekvenser. Vi kan som ett alternativt initialtillstånd t ex välja en situation där en viss del av kapslarna har ett defekt kopparhölje (som inte upptäckts i kvalitetskontrollen vid tillverkningen) men för övrigt använda samma förutsättningar som ovan. Detta skulle ge en alternativ utvecklingsväg för förvaret, troligen med andra konsekvenser än den första. Denna utvecklingsväg kan t ex benämnas kapsel-defektscenario.

Andra omständigheter att utreda vore olika alternativ vad gäller påverkan från/växelverkan med förvarets omgivning, t ex klimatförändringar, jordskalv och mänskliga intrång. Var och en av dessa förutsättningar ger unika utvecklingsvägar och konsekvenser.

Valet av scenarier, eller snarare valet av en uppsättning olika förutsättningar för scenarier, är en central del i en systematiskt genomförd säkerhetsanalys. De valda scenarierna skall tillsammans ge en rimlig täckning av tänkbara utvecklingsvägar för förvaret. Tekniken att analysera flera olika scenarier är därmed bland annat ett sätt att hantera osäkerheter i kunskapen om initialtillstånd och yttre påverkan/växelverkan. Metoden för val av scenarier diskuteras vidare i avsnitt 2.3.

Inom ramen för ett scenario ryms ofta ett antal varianter. Även varianter kan användas för att analysera alternativa initialtillstånd: Man kan t ex vilja belysa hur olika utsträckningar av en osäkert belägen sprickzon i berggrunden skulle påverka förvarets säkerhet. Gränsen för vad som är ett eget scenario eller bara en variant av ett annat scenario är flytande och egentligen en definitionsfråga. Det viktiga är att scenarierna med sina varianter tillsammans ger en rimligt täckande bild av möjliga framtida utvecklingsvägar. Även osäkerheter i förståelsen av olika processer kan studeras med varianter av ett och samma scenario. Olika modeller för hur vatten transporteras i berggrunden kan t ex användas i två för

övrigt identiska varianter. Också osäkerheter i data till olika processer kan studeras med varianter.

### 2.1.3 Fyra moment

Genomförandet av en säkerhetsanalys kan förenklat sägas bestå av de fyra momenten

- Systembeskrivning
- Val av scenarier
- Analys av valda scenarier
- Utvärdering av resultat och rapportering

Med denna allmänna inledning som bakgrund presenteras nedan program och mål för de två första momenten i metodiken: Metoden för systembeskrivning samt metoden för val av scenarier. De återstående två momenten kan inte på samma sätt diskuteras i generella metodtermer. De får i stället exemplifieras vid det praktiska genomförandet av en analys, vilket kommer att göras i SR 97.

## 2.2 Systembeskrivning

Systembeskrivningen är enligt ovan alltså en strukturerad presentation av förvarssystemets tillståndsvariabler, som bland annat uttrycker förvarets fysiska struktur, samt av de processer som förändrar förvaret över tiden.

Tidigare har denna information strukturerats i interaktionsmatriser /2-1, 2-2/. Idag finns matriser som beskriver närzon, fjärrzon och buffert. Systembeskrivningen har sedan dess utvecklats till ett format som är mer lämpat för säkerhetsanalysens genomförande och rapportering. I grova drag kommer systembeskrivningen för SR 97 att göras på följande sätt:

1. Förvaret indelas i de fyra systemdelarna bränsle (inklusive kapselns hålrum), kapsel, buffert/återfyllnad samt geosfär.
2. För varje systemdel (t ex bufferten) görs en lista på alla de processer som är verk-samma. Listan bygger på de processer som tidigare bedömts som centrala i arbetet med interaktionsmatriserna. För att ge ytterligare struktur åt beskrivningen delas processerna in i kategorierna termiska (t ex värmeledning i bufferten), hydrauliska (t ex vattentransport i bufferten), mekaniska (t ex svällning i bufferten) och kemiska (t ex jonbytesprocesser i bufferten).
3. Inom en systemdel går man sedan igenom samtliga processer i syfte att finna en lämplig uppsättning tillståndsvariabler för just den systemdelen. Viktiga tillstånds-variabler i t ex bufferten är dess geometriska mått, temperatur, smektithalt, vattenhalt, porvattentryck och porvattensammansättning.

Varje process dokumenteras på ett strukturerat sätt som bland annat omfattar en allmän beskrivning av processen, redovisning av modellstudier/experimentella studier, diskussion om osäkerheter samt uppgifter om hur processen kan hanteras i säkerhetsanalysen. En första version av en sådan dokumentation kommer att presenteras med SR 97.

Varje process kan schematiskt illustreras på ett enhetligt sätt. Samtliga processer inom en systemdel kan sedan ställas samman till ett s k THMC-diagram. Diagrammet bygger på listan av THMC-processer (steg 2 ovan) och tillståndsvariablerna (steg 3). I diagrammet uttrycks även växelverkan mellan olika systemdelar. Även här gäller att två angränsande systemdelar i huvudsak påverkar varandra termiskt, hydrauliskt, mekaniskt och kemiskt.

De fyra THMC-diagrammen för bränsle, kapsel, buffert/återfyllnad och geosfär samt deras dokumentation utgör därmed systembeskrivningen för en säkerhetsanalys. Samma struktur skall kunna ligga till grund för beskrivningen av förvarets utveckling i analysen av de olika scenarierna.

### **2.2.1 Mål och program**

Mål: Det skall finnas en databas med processbeskrivningar som direkt kan användas i kommande säkerhetsanalyser.

Användandet av systembeskrivning i form av THMC-diagram och processbeskrivningar i SR 97 utvärderas.

Därefter utvecklas en väldokumenterad databas med processer, tillståndsvariabler och kopplingar baserad på THMC-beskrivningen. Databasen skall innehålla dokumentation om samtliga väsentliga processer på ungefär samma nivå som i den speciella underlagsrapport med processbeskrivningar som sammanställs för SR 97. Den skall kunna uppdateras successivt och till stora delar återanvändas i kommande säkerhetsanalyser.

Databasen kan lämpligen utformas som en utvidgning och komplettering av SKB:s databas över egenskaper, händelser och processer av betydelse för förvarets säkerhet. SKB:s databas skall även kopplas till OECD/NEA:s nyligen färdigställda internationella databas. Därigenom kan jämförelser med likartade databaser framtagna inom andra länders avfallsprogram underlättas. Utnyttjandet av andra databaser kan vara ett led i att kontrollera systembeskrivningens fullständighet.

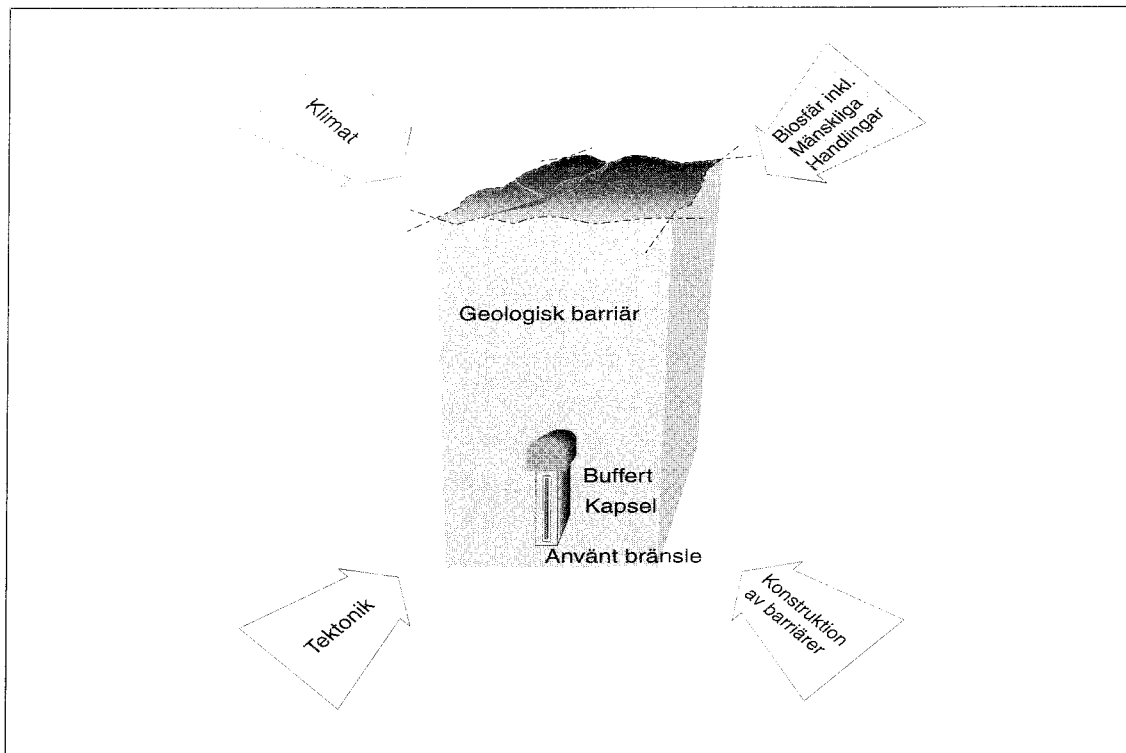
THMC-diagram med tillhörande dokumentation utgör ett av flera möjliga format för en systembeskrivning. Mot bakgrund av utvärderingen av tillämpningen inom SR 97 bedöms och specificeras behovet av vidareutveckling. Systembeskrivningen i den planerade säkerhetsanalysen av djupa hål kan komma att genomföras med helt eller delvis ny metodik. Objektorienterad analys /2-3, 2-4/ kan vara ett alternativ eller komplement till dagens metodik.

## **2.3 Metod för val och formulering av scenarier**

Hur skall då scenarierna väljas för att ge en rimlig täckning av utvecklingsvägar för förvaret? För närvarande tillämpas följande tillvägagångssätt: Tänkbara initialtillstånd och möjliga former av yttre växelverkan/påverkan gås systematiskt igenom. Liksom i systembeskrivningen delas växelverkan/påverkan in i termisk, hydrologisk, mekanisk och kemisk. Konsekvenserna för funktion och säkerhet uppskattas genom att beskriva hur förvarssystemet utvecklas i de olika fallen.

Tänkbara initialtillstånd gås igenom genom att samtliga tillståndsvariabler i systembeskrivningen studeras. Yttre påverkan/växelverkan hanteras genom att omgivande system eller företeelser som förvarssystemet växelverkar med identifieras. Det görs med utgångspunkt från systemets utformning och systembeskrivningen och med stöd av FEP listor.





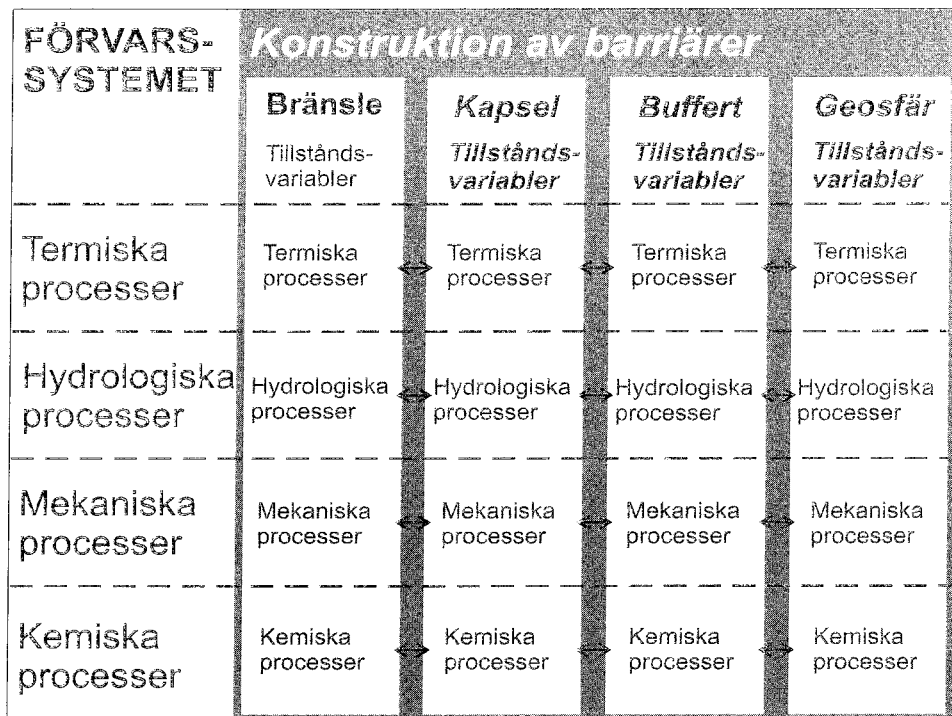
**Figur 2-2.** Fyra kategorier system eller företeelser med potentiell betydelse för förvarssystemets säkerhet kan identifieras.

De identifierade systemen och företeelserna har delats in i fyra kategorier, se Figur 2-2. Inom varje kategori kan ett eller flera scenarier formuleras.

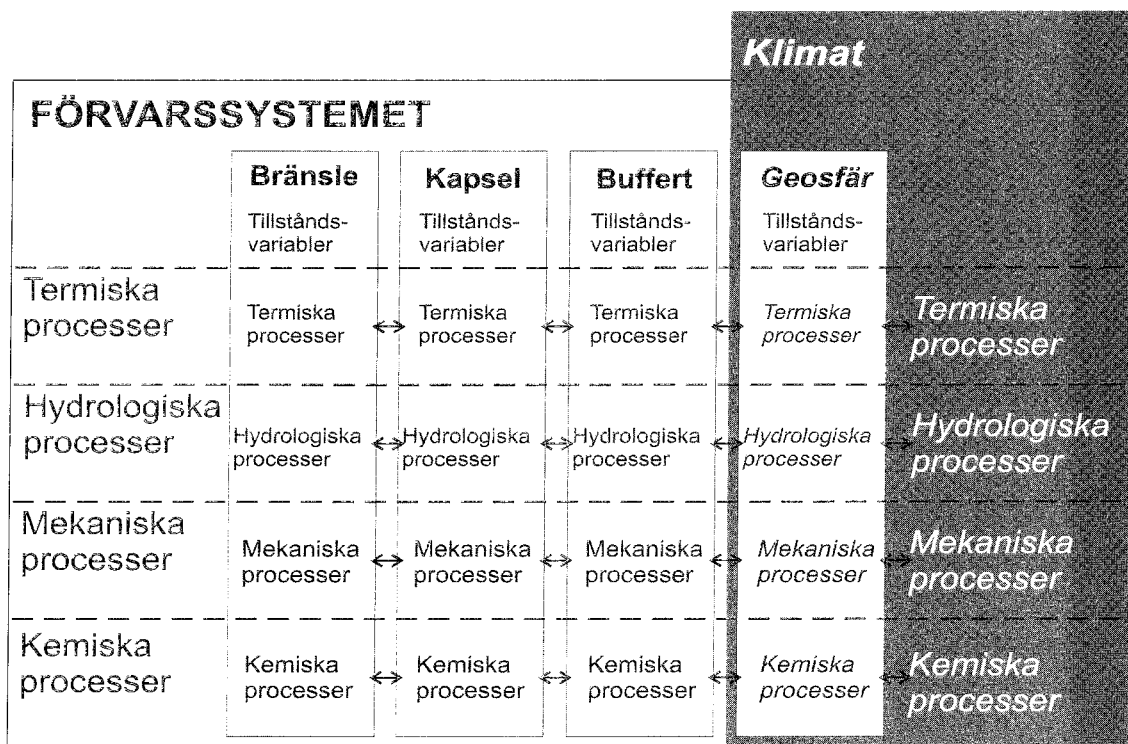
Inom SR 97 går de omgivande system och företeelser som visas i Figur 2-2 igenom. För varje kategori behandlas tänkbar växelverkan i termer av THMC. Direkt inblandade systemdelar identifieras. Termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska kopplingar och deras betydelse för systemdelarna beskrivs. En preliminär bedömning av kopplingens betydelse och förekomst görs. Om kopplingen bedöms vara av betydelse för förvarets säkerhet och/eller sannolikheten att den inträffar bedöms vara stor, formuleras ett scenario baserat på den.

En kategori scenarier berör konstruktion av barriärer. Här utreds hur olika förhållanden och eventuella missöden vid konstruktionen av barriärerna kan påverka förvarets initialtillstånd. Berörda tillståndsvariabler och processer finns utförligt dokumenterade i THMC-diagram och/eller interaktionsmatriser. Underlag för tänkbara variationer ges ofta i systemförutsättningarna för säkerhetsanalysen, och deras konsekvenser utreds inom bas- och kapseldefektscenarierna, se Figur 2-3.

För de övriga kategorierna krävs en separat analys av omgivande system och företeelser. Ett exempel är klimat. Jordens klimatsystem samt hur och varför det förändras beskrivs separat. Klimatförändringarna påverkar förhållandena på ytan av förvaret vilka i sin tur påverkar djupförvaret. De förhållanden på ytan som påverkar djupförvaret beskrivs, uppdelat i termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska, se Figur 2-4. Samma förfarande gäller andra kopplingar som kan sägas vara av karaktären randvillkor eller yttre händelser.



Figur 2-3. System eller företeelser som hör till kategorin konstruktion av barriärer ingår ofta som förutsättningar för säkerhetsanalysen och beskrivs inom systembeskrivningen. Variationer och deras konsekvenser utreds inom de sk bas- och kapseldefekts scenarierna.



Figur 2-4. Förhållanden på ytan orsakade av förändringar av klimatet och dess inverkan på förvarssystemet beskrivs i termer av THMC.

### 2.3.1 Mål och program

Mål: Att utveckla och beskriva en metod för scenarieval baserat på systembeskrivningen. Metoden skall inkludera systematik för:

- Genomgång av realistiska framtida utvecklingsvägar, situationer och tänkbara kritiska situationer eller extremfall
- Hantering av expertutlåtanden
- Formulering och motivering av scenarier
- Spårbarhet till säkerhetsanalysens syfte

Programmet innehåller följande åtgärder:

- Beskrivning, dokumentering och utvärdering av den metod för val av scenarier som tillämpats inom SR 97.
- Komplettering av process- och FEP-databasen baserad på THMC-diagram och interaktionsmatriser med ytterligare processer som är knutna till omgivande system och företeelser.
- Formulering av en strategi att hantera scenarier baserade på mänskliga handlingar.
- Vidareutveckling av formulering av klimatscenarier utifrån utvärdering av tillämpningen i SR 97.

En metodik för formulering och analys av tektonikscenarier beskrivs i kapitel 7.

## 2.4 Hantering av osäkerheter

Hantering av osäkerheter är en integrerad del av arbetet med en säkerhetsanalys och kan därför egentligen inte beskrivas som en separat aktivitet. I metodikbeskrivningen för säkerhetsanalysen är det ändå värdefullt att systematiskt gå igenom olika typer av osäkerheter och metoden för hur de hanteras.

### 2.4.1 Mål och program

Mål: Det skall finnas praktiskt tillämpbar metod för hantering av osäkerheter.

Som framgick av inledningen är underlaget till en säkerhetsanalys alltid behäftat med osäkerheter av flera slag.

En viktig del av en säkerhetsanalys består i att hantera dessa på ett metodiskt sätt, visa vad olika typer av osäkerheter betyder för resultatet av analysen etc.

I SR 95 /2-5/ finns en systematisk genomgång av olika typer av osäkerheter och hur de kommer in i säkerhetsanalysens olika steg. I SR 97 är ambitionen att gå ett steg vidare i den praktiska hanteringen av osäkerheter i en analys. Här följer en kort beskrivning av hur olika typer av osäkerheter kommer att hanteras i SR 97.

### ***Kvalitativa osäkerheter***

Processidentifiering: Identifieringen och rankningen av processer från FEP-databaser, via interaktionsmatriser till THMC-diagram kommer att beskrivas och dokumenteras i SR 97.

Processförståelse: En diskussion om förståelsen och konceptuella osäkerheter förs i dokumentationen till systembeskrivningen som utgör en del av redovisningen av SR 97.

Systembeskrivning och tillståndsvariabler: Ett viktig egenskap hos den nya processororienterade beskrivningen i form av THMC-diagram är att den skall vara generell och fritt tillåta tillägg av processer och tillståndsvariabler efter behov. Tillståndsvariabler kan fritt läggas till alltefter som eventuella nya processer kräver nya variabler för att passa in i beskrivningen. Ytterst avgörs frågan ifall valet av variabler är adekvat av hur väl man förstår alla ingående processer och deras inbördes relationer.

Osäkerheter i förståelsen av växelverkan med förvarets omgivning: Denna fråga relaterar direkt till valet av scenarier, se avsnitt 2.3.

### ***Kvantitativa osäkerheter***

Numeriska osäkerheter i indata till transportberäkningar: För alla processer som direkt påverkar utsläpp och spridning av radionuklider görs en enhetlig behandling av numeriska osäkerheter i indata enligt en bestämd mall. Resultatet av denna hantering av numeriska osäkerheter kommer att presenteras i en särskild underlagsrapport till SR 97. Sedan bilden av indata med vidhängande osäkerheter klarlagts formuleras ett antal varianter av beräkningsfall för att illustrera betydelsen av olika osäkerheter.

Numeriska osäkerheter i initialtillståndet: Initialtillståndet kommer att diskuteras kvalitativt och kvantitativt i dokumentationen till systembeskrivningen till SR 97. Många aspekter av initialtillståndet kommer direkt in i transportberäkningarna, t ex skadefrekvens på kapslarnas kopparhölje eller inventariet av radionuklider. Sådana osäkerheter hanteras vid formuleringen av olika beräkningsvarianter enligt ovan. Andra osäkerheter, t ex situationen vad gäller bergspänningar kring förvaret behandlas i särskilda diskussioner.

Numeriska osäkerheter i växelverkan med omgivningen: Dessa hanteras från fall till fall vid de enskilda analyserna av de omgivande systemen.

### ***Program***

Den vidare utveckling som erfordras blir beroende på utfallet av SR 97-granskningen.

Tillämpningen av metoden för att hantera osäkerheter ger en möjlighet att identifiera dominerande osäkerhetsområden. Eventuella insatser för att reducera osäkerheterna diskuteras i anslutning till de olika forskningsområdena.

## 2.5 Var återfinns säkerhetsanalysens processer i forskningsprogrammet?

Enligt avsnitt 2.2 identifieras i säkerhetsanalyser en rad processer som på sikt kan leda till förändringar i förvaret. För varje process beskrivs bl a kunskapsläge, kvarstående osäkerheter och hur processen skall hanteras i en integrerad säkerhetsanalys.

Ambitionen är att från och med den kommande säkerhetsanalysen SR 97, kunna aktivt använda utvärderingarna i säkerhetsanalysen till att göra prioriteringar i forskningsprogrammet.

Det kan dels gälla att identifiera aspekter av olika processer där ytterligare forskning är befogad för att bättre kunna utvärdera den långsiktiga säkerheten, dels göra bedömningen att ytterligare forskning kring en process inte är motiverad.

Som ett första steg mot detta mål visar vi i Tabell 2-1 var de olika processer som hanteras i säkerhetsanalysen finns upptagna i forskningsprogrammet. Tabellen omfattar de processer som identifierats i SR 97 för bränsle, kapsel, buffert/återfyllnad och geosfär. Observera att den slutliga processindelningen i SR 97 kan komma att skilja sig från tabellen på enstaka punkter.

För många processer har kunskapen bedömts som tillräcklig och de återfinns därför inte i forskningsprogrammet. Detta betyder dels att kunskapen om processen är tillräcklig för att en säkerhetsanalys som på något sätt inkluderar processen ifråga skall kunna genomföras, dels att ytterligare kunskap inte på något avgörande sätt kan bedömas leda till en förfinad, mindre pessimistisk hantering av processen i säkerhetsanalysen.

**Tabell 2-1. Tabellen visar de termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som kommer att hanteras i SR 97. För kapseln finns även kategorin kärnfysikaliska processer. Det slutliga urvalet av processer i SR 97 kan på vissa punkter komma att skilja sig från tabellens indelning. För varje process visas i vilket avsnitt i FUD-program 98 processen finns upptagen, alternativt att kunskapen om processen bedömts som tillräcklig.**

---

Process	Avsnitt där mål och program beskrivs
---------	--------------------------------------

---

\*Endast relevant om kopparkapseln är skadad

---

### BRÄNSLE/HÅLRUM I KAPSEL

#### Kärnfysikaliska processer

Radioaktivt sönderfall	3.2 (Tillräcklig kunskap)
Inducerad fission (kriticitet)*	Tillräcklig kunskap

#### Termiska processer

Värmeutveckling/attenuering	3.2
Värmetransport	Tillräcklig kunskap

#### Hydrauliska processer

Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation*	3.5
---	-----

#### Mekaniska processer

Värmeutvidgning/kapslingsbrott	Tillräcklig kunskap
--------------------------------	---------------------

Process	Avsnitt där mål och program beskrivs
<b>*Endast relevant om kopparkapseln är skadad</b>	
<b>Kemiska processer</b>	
Radiolys av vatten i kapselns hålrum	Tillräcklig kunskap
Radiolys av restgas i kapselns hålrum	Tillräcklig kunskap
Korrosion av bränslets metalldelar*	Tillräcklig kunskap
Upplösning/omvandling av bränsle*	4.6 (3.3)
Vattenlösning av gapinventarium*	Tillräcklig kunskap
Speciering av korrosionsprodukter från gjutjärnsinsats*	3.4
Speciering av radionuklider, kolloidbildning*	4.6,10.8 (3.6)
Heliumproduktion	3.2 (Tillräcklig kunskap)
<b>Radionuklidtransport</b>	
Advektion*	Tillräcklig kunskap
Diffusion*	Tillräcklig kunskap (3.6)
Sorption i kapseln*	Tillräcklig kunskap (3.6)
Kolloidtransport i kapseln*	Tillräcklig kunskap
Radionuklidnuklidtransport med gas*	Tillräcklig kunskap
<b>GJUTJÄRNSINSATS/GAP/KOPPARKAPSEL</b>	
<b>Termiska processer</b>	
Värmealstring/stråldämpning	Tillräcklig kunskap
Värmetransport	Tillräcklig kunskap (5.3)
<b>Mekaniska processer</b>	
Deformation gjutjärnsinsats	5.3
Deformation kopparkapsel från yttre övertryck	5.3
Värmeutvidgning/sammandragning	5.3
Deformation från inre korrosionsprodukter*	5.2
<b>Kemiska processer</b>	
Korrosion gjutjärnsinsats*	5.2
Galvanisk korrosion*	Tillräcklig kunskap
Spänningskorrosion gjutjärnsinsats	
Strålinducerade processer i gjutjärnsinsats	Tillräcklig kunskap
Korrosion kopparkapsel	5.1
Spänningskorrosion kopparkapsel	5.1
Strålinducerade processer i kopparkapsel	Tillräcklig kunskap
Radionuklidtransport* - se radionuklidtransport under bränsle/hålrum i kapsel	
<b>BUFFERT/ÅTERFYLLNAD</b>	
<b>Termiska processer</b>	
Värmetransport	Tillräcklig kunskap (14.4.5)
Värme generering/attenuering	Tillräcklig kunskap
<b>Hydrauliska processer</b>	
Vattentransport vid omättade förhållanden	6.4.1
Vattentransport vid mättade förhållanden	6.4.1
Gastransport	6.6.2, 6.4.3

Process	Avsnitt där mål och program beskrivs
<b>*Endast relevant om kopparkapseln är skadad</b>	
<b>Mekaniska processer</b>	
Svällning	6.3 (14.4.5)
Erosion	Tillräcklig kunskap
Mekanisk växelverkan buffert/återfyllnad	6.3 (14.4.5)
Mekanisk växelverkan buffert/kapsel	5.3
Mekanisk växelverkan buffert/närfältberg	6.6.2 (14.4.5)
Mekanisk växelverkan återfyllnad/närfältberg	6.3
Mekanisk växelverkan återfyllnad/pluggar	14.4.5
Termisk expansion	Tillräcklig kunskap
<b>Kemiska processer</b>	
Jonbytesprocesser; ytkemiska processer	6.4.2
Kemisk smektitnedbrytning	6.6.2 (14.4.5)
Lösning/fällning föroreningar	(6.2.5, 14.4.5)
Kolloidbildning	10.8
Strålinducerad smektitnedbrytning	Tillräcklig kunskap
Radiolys av porvatten	Tillräcklig kunskap
Mikrobiella processer	10.8
Advektion	Tillräcklig kunskap
Diffusion	Tillräcklig kunskap
(6.6.1, 6.4.2)	
Gaslösning	Tillräcklig kunskap
Interaktion pluggbetong/återfyllnad	6.5
<b>Radionuklidtransport</b>	
Diffusion*	Tillräcklig kunskap (4.2, 6.4.2, 6.6.1, 10.2)
Sorption*	Tillräcklig kunskap (6.6.1, 6.4.2)
Advektion*	Tillräcklig kunskap
Kolloidtransport*	10.8
Speciering*	Se bränsle/hållrum
Sönderfall*	Tillräcklig kunskap
<b>GEOSFÄR</b>	
<b>Termiska processer</b>	
Värmetransport	Tillräcklig kunskap
<b>Hydrauliska processer</b>	
Grundvattenrörelser	3.7, 8.3
Gastransport	8.3
<b>Mekaniska processer</b>	
Sprickbildning	7.6
Reaktivering	7.6
Krypdeformationer	7.6
Termiskt orsakade deformationer	7.6
<b>Kemiska processer</b>	
Advektion, blandning	9.6 (9.3.1)
Diffusion	9.6 (9.3.2)
Lösning/fällning bergmatrix	9.6 (9.4)
Lösning/fällning sprickmineraler	9.6 (9.4.5)
Mikrobiella processer	9.6 10.8 (9.4.3)
Kolloidbildning	9.6 (9.4.4)
Gasbildning/gaslösning	9.6 (9.3.3)
Saltutfrysning	Tillräcklig kunskap

Process	Avsnitt där mål och program beskrivs
*Endast relevant om kopprkapseln är skadad	
<b>Radionuklidtransport</b>	
Advektion och dispersion*	Tillräcklig kunskap
Sorption*	10.8 (10.1, 10.2)
Molekylär diffusion samt matrisdiffusion*	3.7.1, 10.8 (10.2)
Kolloidtransport*	(10.3)
Speciering*	(10.4)
Transport i gasfas*	10.8, (10.3)
Sönderfall*	Tillräcklig kunskap



## **3 Modeller för säkerhetsanalys**

Vissa datormodeller utvecklas speciellt för användning inom säkerhetsanalysen. Målet för arbetet med dessa modeller och deras tillhörande databaser är att de skall hållas aktuella vad gäller förståelse om de modellerade processerna och utvecklingen inom datorområdet. Vissa av modellerna skall vara så utformade att de kan kopplas i beräkningskedjor.

Delmål under perioden specificeras under respektive rubrik nedan.

### **3.1 Hantering av kopplade modeller**

Sedan länge har SKB haft tillgång till ett programpaket, PROPER, avsett för probabilistiska beräkningar av radionuklidtransport. Under de senaste åren har ett modernt meny-baserat användargränssnitt, MONITOR 2000, utvecklats och fungerar idag tillfredsställande.

#### **3.1.1 Mål och program**

Programvård och successiva uppdatering av bland annat MONITOR 2000 och PROPER förutses under perioden. PROPER används numer i en miljö med flera datorer. Detta har ställt nya krav på PROPER:s källkod. Det har också öppnat nya möjligheter för att minska kalendertiden när flera beräkningsfall skall genomföras med PROPER eftersom MONITOR 2000 kan fördela beräkningsarbetet på flera datorer och på så sätt arbeta parallellt.

MONITOR 2000 utvärderas efter SR 97. Användningen av MONITOR 2000 skall successivt öka i den takt det praktiskt är möjligt. I MONITOR 2000 skall utveckling av användarvänliga rutiner för att förenkla omfattande beräkningsuppgifter, underhållning och anpassning till nya PROPER submodeller genomföras. Hela PROPER-paketet skall ses över med målet att minska dagens exekveringstider.

### **3.2 Modeller för radionuklidinventarium och resteffekt**

Radionuklidinventarier och resteffekt för det använda bränslet beräknas med koderna ORIGIEN-2, CASMO och SCALE. Det finns fyra typer av osäkerheter i beräkningarna: reaktionstvårsnitt, utbyten, sönderfallskonstanter och  $s_k$  kermakonversionsfaktorer för neutrondosberäkningar. Trots osäkerheterna bestämmer modellerna inventariet med en osäkerhet på högst 12 procent för fissionsprodukter och 20 procent för aktinider.

Beräkningsprogrammen och underliggande data ger således en god grund för att bestämma källtermen för dos- och temperaturberäkningar.

#### **3.2.1 Mål och program**

SKB skall ha fortsatt tillgång till moderna beräkningsprogram för radionuklidinventarier och resteffekt.

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

### **3.3 Modeller för bränsleupplösning/omvandling**

#### **3.3.1 Allmänt om bränsleupplösningssmodeller**

Den största andelen av radionukliderna i använt kärnbränsle ligger inbäddade i urandioxidmatrisen och kan inte frigöras förrän matrisen har lösts upp eller omvandlats strukturellt. I en säkerhetsanalys behövs därför en beräkningsmodell som beskriver upplösning/omvandling av urandioxiden i bränslet.

Tre möjliga angreppssätt för en sådan modell är:

- att se bränslets löslighet som begränsad av urandioxiden och beräkna upplösningen som en produkt av vattenomsättningen och lösligheten;
- att anta att U(IV) i bränslet oxideras till U(VI) av radiolytiskt producerade oxidanter. Hastigheten är beroende på reaktionshastigheten mellan oxidanter och bränsle samt produktionen av oxidanter;
- att anta att bränslematrisen inte har någon barriärfunktion alls och att radionuklider frigörs från individuella löslighetsbegränsande faser.

I en säkerhetsanalys använder man den modell som bäst representerar verkligheten eller en som säkert överdriver konsekvenserna. Osäkerheter i såväl förståelse som tillgängligt dataunderlag kan också göra det intressant att demonstrera skillnader i resultat från olika modeller.

#### **3.3.2 Löslighetsbegränsad modell**

I en löslighetsbegränsad modell förutsätts att radiolytiskt producerade oxidanter inte har någon betydelse för bränslets stabilitet. Tillgången på järn (II och 0) i kapseln tillsammans med de relativt låga dosraterna skulle kunna göra detta möjligt. Bränslelakförsök under anoxiska förhållanden visar också att det är möjligt att någon nämnvärd oxidation inte förekommer. Lösligheten för urandioxid i bränsle ligger i närheten av  $10^{-7}$  M. Vattenomsättningen i en skadad förvarskapsel kan uppskattas till 0,01–1 liter/år beroende på storleken på skadan i kapselhöljet. En löslighetsbegränsad modell ger, med dessa data och 10 000 mol uran i en kapsel, en upplösning av bränslet som ligger i storleksordningen en hundratusendel till en tiotusendel av bränslet under en miljon år.

#### **3.3.3 Modell med radiolytisk oxidation**

Det kan inte uteslutas att radiolytisk oxidation har betydelse för upplösningen av bränslematrisen. I exempelvis SR 97 används därför en modell som beskriver upplösningen som funktion av oxidantproduktion och oxidantreaktion för att beräkna matrisupplösningen.

Radiolys sönderdelar vatten i lika delar oxiderande och reducerande specier. En av de reducerande specierna,  $H_2$ , är betydligt mer reaktionströg än de oxiderande specierna, vilket kan medföra en nettooxidation av bränslet.

Idén med en modell som beskriver en radiolytisk oxidation presenterades först i SKB 91 /3-1/. Där antogs att oxidationen liksom frigörelsen av radionuklider var proportionell mot  $\alpha$ -dosraten i bränslet och proportionalitetskonstanten härleddes ur frigörelsehastighet för strontium-90 från bränslelakförsök under oxiderande förhållanden. Liknande modeller har också använts i TVO-92 och SITE-94.

### **Förutsättningar**

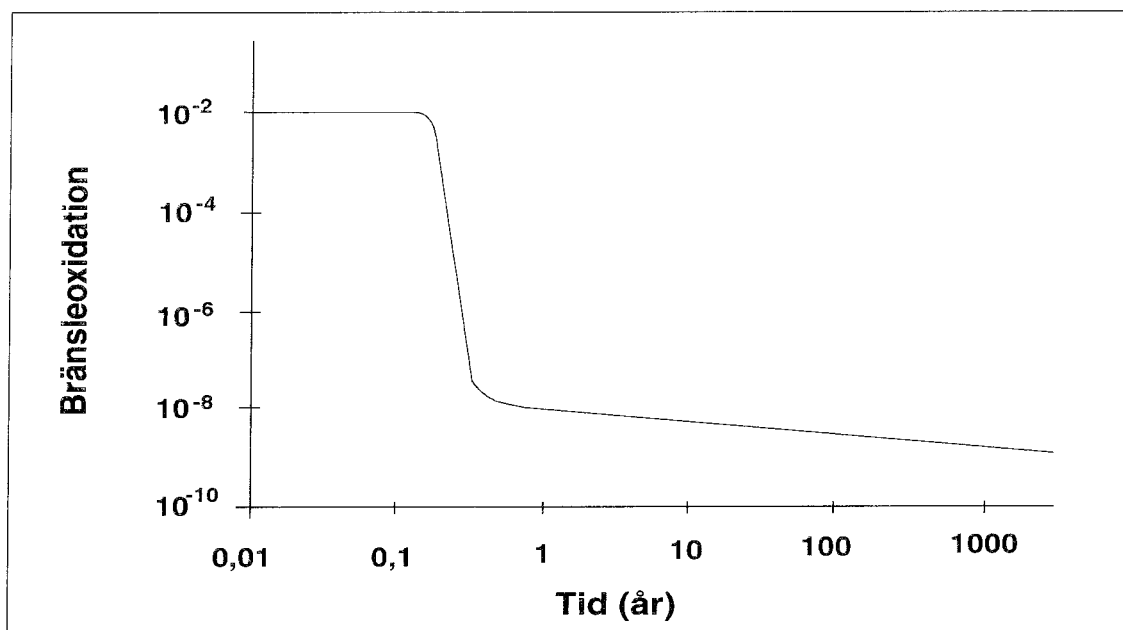
Inför SR 97 har en ny och mer sofistikerad radiolysoxidationsmodell tagits fram. Modellen baseras på beräknad produktion av radiolytiskt producerade specier i vatten och reaktion mellan dessa och urandioxiden. Förutsättningarna i modellen är:

- De radiolytiska reaktionerna antas äga rum i ett 100  $\mu\text{m}$  tjockt vattenskikt runt bränslekutsarna. Detta baseras på storleken på spalten mellan bränsle och kapsling som är 100  $\mu\text{m}$  vid tillverkningen. Kapslingen antas vara defekt så att vatten kan läcka in, men på grund av dess stora motstånd mot allmänkorrosion antas att den i övrigt fysiskt kommer att omsluta bränslet under mycket långa tider. Det tunna vattenskiktet gör att inga koncentrationsgradienter kommer bildas för de radiolytiskt producerade specierna eftersom diffusionen över 100  $\mu\text{m}$  är mycket snabb och konstanta koncentrationer därför kan antas över hela skiktet. Om man i stället antar att bränslekutsarna har fri tillgång till vatten, dvs att vattenskiktet är mycket större än 100  $\mu\text{m}$ , måste hänsyn tas till koncentrationsgradienter och transport inom skiktet. Idag finns ingen modell som klarar detta, men beräkningar, med ökande skikt indikerar att den slutliga bränsleupplösningshastigheten är oberoende av skiktets tjocklek.
- Hänsyn tas till både  $\alpha$ - och  $\beta$ -radiolys.  $\beta$ -radiolysen producerar företrädesvis radikaler medan  $\alpha$ -radiolysen producerar molekylära specier.
- Reaktionerna mellan  $\text{H}_2\text{O}_2$  och  $\text{O}_2$  och urandioxid antas vara av första ordningen.
- Reaktionshastigheten mellan de molekylära oxidanterna  $\text{H}_2\text{O}_2$  och  $\text{O}_2$  och urandioxiden tas från experimentellt uppmätta värden (med antagandet av första ordningens reaktion).
- Bildad  $\text{H}_2$  läcker inte ut utan kommer att stanna i systemet. Detta kan motiveras med att partitaltrycket av vätgas i kapseln från korrosion av stålinsatsen kommer att vara högre än det från radiolys.
- Cirka fyrtio reaktioner tas med i beräkningarna varav två reaktioner med urandioxid.

### **Beräkningsresultat**

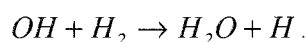
Simuleringar med modellen visar att systemet når ett slags "pseudo-steady-state" efter en period av en månad till ett år.

Då når koncentrationerna av  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  och  $\text{O}_2$  mer eller mindre konstanta värden och hastigheten för oxidationen av urandioxid antar ett lågt värde. Detta värde sjunker långsamt med tiden, men kan, för säkerhetsanalysens ändamål, betraktas som konstant. Med referensvärden på samtliga parametrar i modellen svarar det beräknade värdet mot att andelen  $10^{-8}$  av bränslet löses upp varje år (Figur 3-1). Steady-state situationen orsakas av



Figur 3-1. Oxidationshastighet (uttryckt som väteproduktion) som funktion av tid.

att när koncentrationen av  $H_2$  i lösning når ett visst värde (ca  $10^{-3}$  M) börjar reaktioner mellan  $H_2$  och radikaler att bli viktiga:



Atomärt väte är mycket reaktivt och reagerar i sin tur med  $H_2O_2$  och  $O_2$ .

### 3.3.4 Modell med omedelbar upplösning

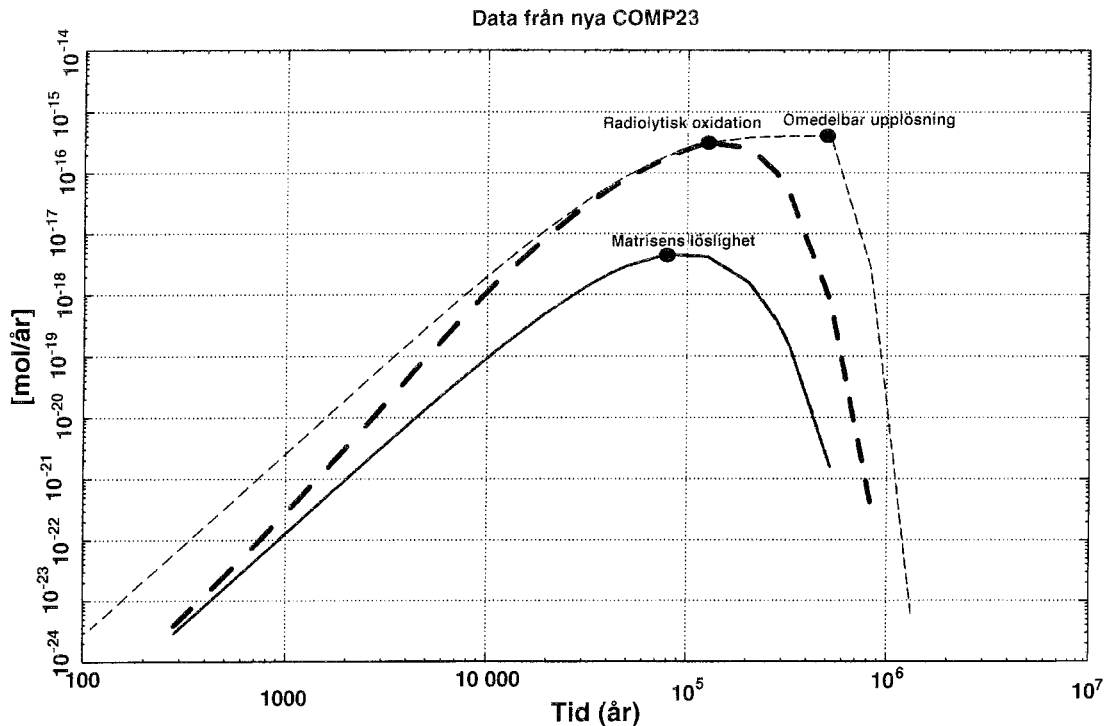
En modell där allt bränsle omedelbart löses är helt orimlig, men kan användas som ett pessimistiskt fall som säkert överskattar konsekvenserna av bränsleupplösning i säkerhetsanalysen.

#### Jämförelser

En modell baserad på lösligheten för uran ger en upplösning/omvandlingshastighet på mellan ungefär  $10^{-11}$  och  $10^{-13}$  (andel av inventariet per år med antagandet att vattenomsättningen i kapseln ligger mellan 0,01 och 1 liter/år), oxidationsmodellen för SR 97 ger hastigheten  $10^{-8}$  per år medan modellen med omedelbar upplösning har en oändlig upplösningshastighet. Även om skillnaderna är stora, blir konsekvensen för säkerheten begränsad av två skäl:

De nuklider som dominerar utsläppen från förvaret är inte helt matristrogna utan förekommer i segregerade faser som frigörs även om matrisen är stabil.

Många helt matristrogna nuklider, som t ex plutonium, har mycket låga individuella lösligheter och frigörs mycket långsamt även om matrisen löser upp sig snabbt.



Figur 3-2. Utsläpp av Pu-239 från närområdet med olika bränsleomvandlingsmodeller.

Ett exempel på den senare effekten är att Pu-239, med ett inventarium av 20 mol per kapsel och en löslighet av  $10^{-9}$  M, frigörs med takten  $10^{-10}$  till  $10^{-12}$  per år på grund av dess individuella löslighet. Detta medför att skillnaden i frigörelse inte blir dramatisk då olika matrisomvandlingsmodeller används (se Figur 3-2).

Nuklider med låga halter i bränslet, t ex Am-241, påverkas dock avsevärt av olika matrisomvandlingshastigheter, eftersom en låg omvandlingshastighet gör att det tar mycket lång tid för nukliden att nå sin mättnadskoncentration i kapseln. I fallet Am-241 innebär en omvandlingshastighet på  $10^{-8}$  att den aldrig kommer att nå sin mättnadskoncentration.

### 3.3.5 Mål och program

Utvecklingen av modeller för bränsleupplösning sker inom bränsleprogrammet. Målet för säkerhetsanalysen är att ta fram verktyg för att kvantifiera frigörelsen av radionuklider från bränslet baserat på bästa möjliga underlag.

Den beräkningsmodell som tagits fram för SR 97 kommer att testas och granskas.

För att stärka underlaget för kommande säkerhetsanalyser kommer en alternativ modell att utvecklas, testas och jämföras med de som används idag. Även denna modell baseras på radiolytisk oxidation av bränslet, men tar också hänsyn till andra komponenter i närområde som kapsel, buffertföroreningar, etc.

### 3.4 Kemisk modellering i närområdet

En realistisk beskrivning av den kemiska miljön i närområdet är viktig för beräkningar av radionuklidlösligheter och transport, men också för bedömning av de tekniska barriärernas stabilitet och livslängd. Den kemiska miljön bestäms av en mängd faktorer:

- Den naturliga grundvattensammansättningen på platsen.
- Påverkan från byggandet av förvaret, framför allt syre från tiden innan förslutning.
- Konstruktions- och förstärkningmaterial och kvarglömt material.
- Bentonit och kopparkapsel.
- Vid ett scenario med defekta kapslar, även av järninsatsen och det använda bränslet.

I den naturliga grundvattensammansättningen är det framför allt pH, jonstyrka och karbonathalt som har betydelse. pH påverkar alla kemiska processer i varierande grad. Jonstyrkan har betydelse för svälltrycket i bufferten och återfyllnaden i tunneln. Karnland /3-2/ visar att även högkompakterad bentonit förlorar sin svällförmåga vid salthalter som överstiger 10 procent dvs 100 g/l. Dock är de salthalter som uppmätts i svenska grundvatten inte så höga. Jonstyrkan och framför allt kalciumhalten har betydelse för jonbytesprocesserna och upplösningen av föroreningar i bufferten.

Djupa grundvatten innehåller normalt inte syre, men luft som finns kvar i deponerings-tunnlarna efter förslutningen av förvaret kan påverka redoxförhållandena kring förvaret i ett tidigt skede. Det finns också spekulationer om att syresatt vatten skulle kunna tränga ner under avsmältningsperioden efter en istid, se kapitlet om grundvattenkemi.

Betong och armeringar från bergförstärkningar och pluggar kommer att ha inverkan på pH-värdet på vattnet i närområdet. Det är dock möjligt att välja betongkvaliteter/kvantiteter så att effekten minimeras.

Bentonitbufferten är den komponent som har den största effekten på kemin i närområdet.

Na-montmorilloniten i bufferten har en yta med två olika slags aktiva positioner: ytpositioner och kantpositioner. Vid ytpositionerna sker jonbytesreaktioner medan kantpositionerna har andra syra/basegenskaper /3-3/. Lermineralets yta har stor betydelse för pH-buffringen i närområdet.

Föroreningarna i bentoniten är stabila i den miljö där leran ursprungligen bröts. I förvaret kommer den däremot att utsättas för ett vatten som i vissa avseenden skiljer sig från det på ursprungsplatsen, både när det gäller sammansättning och temperatur. De flesta av bentonitens föroreningar är trots det stabila i normala svenska grundvatten. Det finns dock några upplösningsprocesser som är viktiga:

- Kalcit är stabilt i grundvatten. I bentoniten kommer dock jonbytesprocessen att konkurrera om de fria kalciumjonerna (jämviktsreaktionen  $2XNa + Ca^{2+} \leftrightarrow X_2Ca + 2Na^+$  konkurrerar med  $Ca^{2+} + HCO_3^- \leftrightarrow \text{kalcit} + H^+$ ). Karbonathalterna i de grundvatten som kommer i kontakt med bentoniten är tillräckligt låga för att jonbytesprocessen skall dominera och kalcit kommer att lösas upp. Detta innebär samtidigt en förbrukning av vätejoner och en höjning av pH. Vattenomsättningen i buffert är mycket låg och reaktionerna nära jämvikt. Beräkningar visar att det kan ta en miljon år att förbruka all kalcit med Gideågrundvatten, men med Äspövatten förbrukas endast 10 % av kalciten under samma tid.

- Pyrit är också stabilt i grundvatten. Inträngande syrehaltigt vatten kan dock oxidera pyriten. Pyritoxidation frigör protoner och kan därigenom sänka pH, men detta buffras med den tidigare nämnda kalcitupplösningen. Det finns tillräckligt med pyrit i bufferten för att garantera att allt initialt syre som finns kvar vid förslutningen av förvaret kommer att förbrukas. Mängden är också tillräcklig för att förhindra att eventuellt inträngande syresatt vatten kommer i kontakt med kapseln i hundratusentals år.
- Kalciumsulfater (gips och anhydrit) och kalcit har lägre löslighet vid höga temperaturer än vid låga. I ett tidigt skede, då kapseltemperaturen är hög, är det möjligt att de löses upp i den kallare delen av bufferten och faller ut på kapselytan.
- Den största andelen av föroreningarna i bentoniten består av kvarts och fältspater. Dessa är stabila i förvarsmiljön, men deras lösligheter ökar med ökad temperatur. I deponeringshålen där en temperaturgradient råder, ger den högre temperaturen vid kapseln, där mättnaden med avseende på löst kisel i porvattnet ger den högsta Si-koncentrationen, upphov till transport av detta element i riktning mot det kallare berget och anrikning och kiselutfällning kan därför bli betydande i de yttre delarna av bufferten.

Kopparkapseln är termodynamiskt stabil i förvarsmiljön och kommer inte att ha någon påverkan på kemin.

Vid en defekt kopparkapsel kan vatten komma i kontakt med järninsatsen och bränslet, vilket kommer att leda till att järnet börjar att korrodera och vattenmolekyler kan sönderdelas med radiolys. Båda dessa processer kan ha avsevärd påverkan på vattnets kemiska sammansättning.

### 3.4.1 Mål och program

Målet är att kunna genomföra en integrerad modellering av de kemiska processerna i närområdet.

Idag finns det modeller tillgängliga för att beskriva de kemiska processerna i närområdet var för sig (jämviktsmodeller, upplösningskinetik, jonbytesmodeller, korrosion etc). Dessa processer är dock i många fall kopplade. Under den kommande perioden kommer studier att genomföras för att belysa hur kemin kan utvecklas om hänsyn tas till samtliga processer, men också hur förvarssystemet reagerar på yttre och inre störningar.

## 3.5 Modellering av skadad kapsels utveckling

Funktionen hos en kapsel med en genomgående skada har nyligen studerats relativt ingående. Ett viktigt resultat är att även en skadad kapsel har potential att förhindra radionuklidtransport under mycket långa tider. En studie för att bedöma vilka tider det kan röra sig om har genomförts och avrapporterats /3-4/. I rapporten presenteras en enkel modell för kapselns utveckling efter ett första genombrott i kapselns ytterhölje av koppar. Modellen används för att förutsäga:

- intrånget av vatten i kapseln (som funktion av storlek och form på defekten, buffertens konduktivitet, korrosionshastigheten och trycket inuti kapseln),

- uppbyggnaden av korrosionsprodukter inuti kapseln (som funktion av tillgängligt vatten i kapseln, korrosionshastigheten och korrosionsprodukternas egenskaper),
- effekten av korrosionsprodukterna på kapselns strukturella integritet.

Ett antal varianter för placeringen av skadan i kopparhöljet har också studerats. Studien visar att det kan ta över tvåhundrausen år innan kapseln kan vattenfyllas även om den hade en initial genomgående defekt.

### 3.5.1 Mål och program

Målet är att kunna beskriva en skadad kapsels utveckling med hänsyn tagen till alla viktiga processer.

En skadad kapsel kan mycket väl vara en mycket effektiv barriär mot radionuklidtransport, men dess utveckling kan vara komplicerad att beskriva, eftersom den beror på en mängd vitt skilda processer. De två viktigaste processerna är inträngningen av vatten i kapseln och förbrukningen av inträngt vatten på grund av korrosion. Dessa processer är i sin tur beroende på en mängd andra processer som gastryck inuti kapseln, tillgänglig yta för korrosion, korrosionsprodukternas egenskaper, skadans storlek och tillväxt etc.

Under den närmaste treårsperioden kommer dessa processer att studeras i detalj; deras relativa betydelse och koppling kommer att utredas. Det kan också bli aktuellt att genomföra någon form av valideringsexperiment. Arbetet kommer att genomföras i samarbete med kapsel och buffertprogrammen.

## 3.6 Modeller för radionuklidtransport m m i närområdet

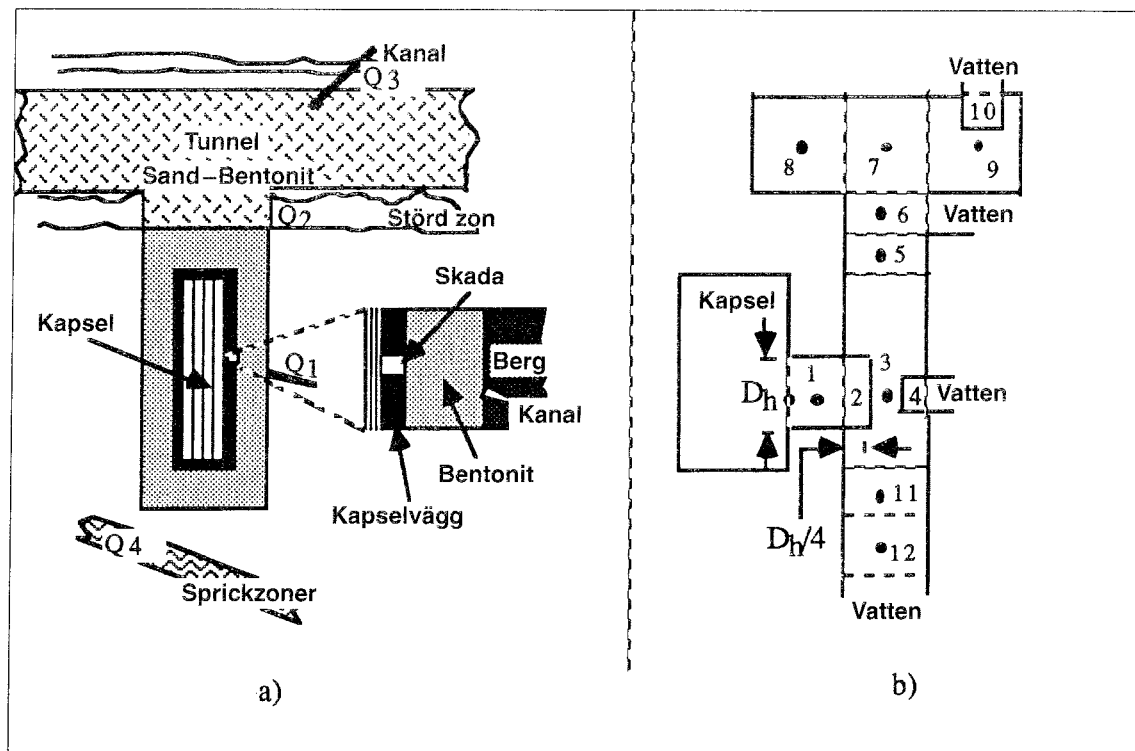
Närområdesmodellen NUSTRAN beräknar radionuklidtransport i komplicerade geometrier /3-5/. Modellen kan även hantera transienta förlopp. Närområdets olika delar såsom hålet i kapselväggen, kapselns innervolym, bufferten, tunnelåterfyllningen, sprickor i deponeringshålet, etc beskrivs som ett antal kompartment, se Figur 3-3. Metoden liknar diskretiseringen som görs i en finit-differens eller integrerad finit-differens modell för tredimensionella problem, men en kompartmentmodell använder betydligt färre celler eller kompartment. För att inte förlora noggrannhet i beräkningarna på grund av den grova diskretiseringen används analytiska uttryck för att hantera transportfenomen i känsliga områden. Exempel på känsliga områden är hålet i kapselväggen och sprickans mynning mot deponeringshålet.

NUSTRAN kan också modellera inverkan av fyllnadsmaterial, skador i zirkaloyrören, och ett växande hål i kapseln. Det finns däremot ingen funktion för att beräkna kapselgenombrott (korrosion eller andra mekanismer) utan genombrottstiden måste specificeras. Dagens version av NUSTRAN kan heller inte beräkna lösligheter delade mellan olika isotoper av samma element.

I modellvarianten COMP23 har NUSTRAN modifierats så att modellen kan användas tillsammans med administrationsprogrammet PROPER i en modellkedja för radionuklidtransport. COMP23 och NUSTRAN är för övrigt identiska.

NUSTRAN har också flera möjligheter för att modellera upplösning/omvandling av urandioxidmatrisen (se avsnittet om bränsleupplösning). Den största andelen av





Figur 3-3. Närområdets geometri och dess beskrivning i NUCTRAN.

fissionsprodukterna och i princip alla aktinider finns inbäddade i matrisen och kan inte frigöras förrän denna har lösts upp. De varianter som finns är:

- upplösning med urandioxidlöslighet,
- upplösning proportionell mot  $\alpha$ -dosraten,
- konstant upplösningshastighet,
- omedelbar upplösning.

NUCTRAN har verifierats mot andra transportmodeller med gott resultat.

Under den gångna treårsperioden har en särskild version av NUCTRAN utvecklats för att kunna göra beräkningar för radionuklidtransport för SFL 3-5, se vidare avsnitt 12.3.

### 3.6.1 Mål och program

Uppgiften är att utveckla och underhålla NUCTRAN/COMP23 som huvudverktyg för radionuklidtransport i närzonen.

En av de viktigaste delarna i utvecklingsprogrammet för NUCTRAN/COMP23 är att förena de varianter som existerar idag i en enda slutgiltig version. Detta arbete kommer att påbörjas då de säkerhetsanalyser som pågår är avslutade. Ytterligare verifieringsstudier kommer att genomföras. Framför allt behöver hanteringen av komplexa geometrier verifieras. I FUD 95 planerades införande av hantering av delade elementlösligheter i

modellen. Detta har inte genomförts och har lägre prioritet, men möjligheten kommer att utredas.

### **3.7 Modeller för grundvattenflöde och radionuklidtransport i fjärrområdet**

I dagsläget har SKB tillgång till en uppsättning olika modeller för grundvattenflöde och radionuklidtransport i berggrunden. De olika modellerna utgörs dels av olika konceptualiseringar av bergmassan och dess vattenförande strukturer, dels av olika numeriska modeller inom samma konceptualisering.

En mer omfattande beskrivning av de olika grundvattenflödes- och radionuklidtransportmodellerna finns i SR 95 /3-6/. Här diskuteras därför främst nya applikationer eller modellförbättringar som skett inom innevarande FUD-period eller sedan säkerhetsanalysen SR 95.

För grundvattenströmning i regional skala används oftast kontinuummodellerna NAMMU eller PHOENICS. Både NAMMU, som är utvecklad av AEA Technology i Storbritannien, och PHOENICS har inom SKB:s applikationer nyligen använts för modellering av grundvattenflöde där densitetseffekter inkluderats /3-7, 3-8/. Även modellering med densitetseffekter försummade har genomförts /3-9/.

För grundvattenströmning i lokal skala har hittills främst HYDRASTAR använts. Detta är en stokastisk kontinuummodell som utvecklats av SKB under flera år. Under innevarande FUD-period har ett antal förbättringar och tillägg gjorts i modellen:

En ny version där de simulerade konduktivitetfälten kan kalibreras mot uppmätta tryckvärden har implementerats /3-10/ och använts i en modelleringsstudie av ett pumpstest vid Äspö Hard Rock Laboratory /3-11/.

Möjligheterna för visualisering av resultat från HYDRASTAR, till exempel konduktivitetfält och sprickzoner, har förbättrats genom utnyttjande av det grafiska paketet AVS.

En ny geostatistisk modell för den rumsliga variabiliteten i hydraulisk konduktivitet har implementerats /3-12/.

Modellen för radionuklidtransport i fjärrzonen är FARF31, en endimensionell transportkod som inkluderar advektiv och dispersiv transport, matrisdiffusion med jämviktssorption i matrisen, samt kedjesönderfall. FARF31 har inte utvecklats under innevarande FUD-period. I stället har arbete utförts för att utröna hur FARF31 skulle kunna modifieras för att tillåta rumslig variabilitet i styrande parametrar såsom till exempel våt yta och matrisporositet.

SKB har fortsatt att utveckla och använda även andra konceptualiseringar än stokastisk kontinuum för modellering av flöde och transport på lokal skala. Kanalnätverksmodellen CHAN3D har redan tidigare utnyttjats för simulering av pump- och tracertest vid Äspö Hard Rock Laboratory /3-13/ och har nu även använts för en säkerhetsanalysstudie med kopplad när- och fjärrzonsbeskrivning /3-14/. Vidare har den diskreta spricknätverksmodellen FracMan utnyttjats i inledande säkerhetsanalysstudier /3-15/. I studien visas hur transportvägar kan beräknas genom en sökalgoritm samt hur parametrar för radionuklidtransportkoder kan beräknas för dessa transportvägar. Även i detta koncept kan en kopplad när- och fjärrzonsbeskrivning uppnås.

Slutligen har arbete även påbörjats för att beskriva radionuklidtransport i PHOENICS genom PHOENICS/PARTRACK. Modellerna CHAN3D, FracMan samt PHOENICS har nu sina egna transportrutiner utvecklade i större eller mindre omfattning och kan sålunda i princip samtliga användas som ersättning för paketet HYDRASTAR/FARF31.

### 3.7.1 Mål och program

De generella målen för modellutveckling inom fjärrzonen är:

- att ha tillgång till relevanta beräkningsverktyg för utförande av säkerhetsanalys,
- att modellerna uppdateras och följer kunskapsutvecklingen inom området,
- att modellerna även delvis skall kunna vara tillämpliga för platsutvärdering inom lokaliseringsarbetet.

Ett specifikt mål inom säkerhetsanalysen är att SKB efter kommande 3-års period bör ha tillgång fullt ut även till alternativa modeller (exempelvis diskreta modeller) för flöde och transport i geosfären.

Den generella inriktning som angivits redan i FUD 95 vad beträffar utveckling av fjärrzonsmodeller inom säkerhetsanalysen fortsätter. Säkerhetsanalysstudien SR 97 kommer att slutföras och granskas under innevarande FUD-period. Beroende på utgången av denna analys och granskning måste ett betydande mått av flexibilitet i framtida modelleringstrategi tillåtas i nuläget.

Utvecklingen och användningen av HYDRASTAR kommer att fortsätta som en viktig komponent i fjärrzonsmodelleringen. Behovet av alternativa geostatistiska modeller för den hydrauliska konduktiviteten, såsom till exempel icke-parametriska eller fraktala modeller, kommer att undersökas och eventuellt implementeras. För att göra HYDRASTAR mer generell och allmänt lämpad för platsspecifik simulering kan det även finnas behov av att kunna inkludera hydraulisk anisotropi samt fler typer av randvillkor än vad modellen idag tillåter. Den fråga som dock bedöms vara en av de viktigaste inför framtiden är utvecklandet av metoder för uppskalning /3-16/. I HYDRASTAR finns en algoritm för uppskalning av värden från mätskala till diskretiseringskala i modellen samt för beräkning av motsvarande regulariserade geostatistiska modeller. Vidare har empiriska skalningssamband mellan mät- och diskretiseringskala utarbetats och använts. Inom forskarvärlden har frågor kring uppskalning intensivt diskuterats en längre tid; det kan finnas behov av att se över rutinerna för uppskalning i HYDRASTAR. En fråga relaterad till uppskalning är hur grundvattenmodellering på olika skalor (regional/lokal) skall kopplas på ett korrekt sätt. Denna fråga väntas även beröras framöver med avseende på kopplingen av NAMMU och PHOENICS med HYDRASTAR. Slutligen bör en utvärdering av möjliga koncept för att konditionera HYDRASTAR:s konduktivitetssfält mot olika typer av geofysiska data genomföras.

Den viktigaste modellen för simulering av radionuklidtransport kommer även framledes att vara FARF31. Som nämndes ovan har möjligheterna att inkludera rumslig variabilitet av transportparametrar längs strömrören undersökts. Denna utveckling kommer att drivas vidare; dessutom kommer användandet av effektiva parametrar att utvecklas. Målsättningen är att genom användandet av effektiva parametrar i den existerande versionen av FARF31 indirekt inkludera effekterna av heterogenitet. Fördelen med detta angreppssätt jämfört med en explicit beskrivning av heterogeniteten i modellen är främst en beräk-

ningsteknisk vinst. För att utröna under vilka förenklade förhållanden användandet av effektiva parametrar fungerar bör även versionen med en explicit beskrivning av heterogeniteten utvecklas till ett färdigt verktyg.

Parallellt med utvecklandet av FARF31 utvecklas möjligheten att göra fullständiga beräkningar av radionuklidtransport i diskreta spricknätverksmodeller (FracMan). I en diskret spricknätverksmodell, där flödesgeometrin explicit beskrivs, kan matrisdiffusion modelleras med en högre grad av realism. Ett antal olika tillvägagångssätt är möjliga för att hantera transport i FracMan. Antingen kan, för vissa dominerande transportvägar, effektiva transportparametrar beräknas och sedan användas i FARF31, alternativt kan transportegenskaperna registreras längs motsvarande transportvägar och sedan användas i den modifierade versionen av FARF31, som explicit tar hänsyn till heterogenitet. Ett tredje, och i vissa avseenden mest tilltalande, alternativ är att lösa transportproblemet direkt i spricknätverket. Då kan till exempel mer komplexa transportfenomen såsom indiffusion i stagnanta delar av sprickorna beskrivas. Möjligheterna att få tillgång till eller utveckla denna typ av transportmodeller kommer att utredas.

Ett koncept med central betydelse för säkerhetsanalysens resultat är den flödesvätta ytan /3-16/, dvs ytan tillgänglig för matrisdiffusion och sorption vid radionuklidtransport. I HYDRASTAR kan denna parameter inte beräknas utan måste för användning i FARF31 uppskattas på annat sätt. I FracMan kan den flödesvätta ytan beräknas direkt utifrån sprickplanens geometri under givna antaganden som beskrivits ovan. Vissa generella frågor kring hur den flödesvätta ytan skall uppskattas/beräknas i enskilda sprickplan återstår dock att lösa. För att svara på dessa frågor kommer ett generiskt utvecklingsarbete möjligtvis att bedrivas. Bland annat kan modellstudier av transport i enskilda sprickor genomföras med syftet att studera kopplingen mellan hydrauliska parametrar och parametrar som styr matrisdiffusionen.

Utvecklingen av flödes- och transportmodellen CHAN3D kommer att fortgå. Under innevarande period kommer utveckling att bedrivas för att undersöka hur modellen kan "valideras" mot fältdata, samt vilken typ av fältmätningar som behövs för detta. Även dispersionskonceptet i modellen kommer att vidareutvecklas. Vidare kommer CHAN3D förmodligen att användas för mer fullständiga säkerhetsanalysstudier med kopplad när- och fjärrzon.

För att enkelt kunna exemplifiera vilka parametrar som har störst påverkan på transporten av radionuklider i geosfären kan det vara en fördel att utnyttja förenklade modeller som ett komplement till de mer komplexa modeller som beskrivits ovan. Existerande analytiska lösningar för relevanta transportprocesser kan här tjäna ett syfte. Ett arbete med att definiera nyckelparametrar, vidareutveckla och implementera befintliga analytiska modeller har påbörjats och kommer att drivas vidare. Resultaten kan vara intressanta både för säkerhetsanalyser och/eller platsutvärdering. Arbetet har således klara kopplingar till de pågående projekt som behandlar hur platsundersökningar skall bedrivas och platsvalsfaktorer definieras. Dessa senare projekt är dock betydligt mer omfattande i målsättning och behandlar även t ex byggnadstekniska samt kemiska och mekaniska stabilitetsaspekter. För en utförlig diskussion om dessa projekt, se /3-17, 3-18/.

### **3.8 Modeller för radionuklidens spridning i biosfären**

För att kunna bedöma de radiologiska konsekvenserna av eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen från ett slutförvar, behöver transporten i biosfären, från grundvattenrecipient till människa och till andra organismer beskrivas. Det övergripande målet för SKB:s studier

av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra trovärdiga konsekvensberäkningar i säkerhetsanalyserna. Det finns tre olika uppgifter som beskrivningen av biosfären skall uppfylla:

- händelser och processer skall beskrivas på ett realistiskt sätt, med en motivering varför vissa processer är betydelsefulla liksom en utförlig motivering varför andra processer har uteslutits,
- utgöra en måttstock för att kunna jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller förvarsplatser,
- visa att myndigheternas krav på säkerhet och gränsvärden uppfyllts.

För modellering som syftar till att visa att dosgränser inte överskrids kan det vara acceptabelt att redovisade konsekvenser är starkt överskattade. Men det krävs en grundlig kunskap om biosfären för att kunna motivera de förenklingar som genomförs i dosuppskattningar vid optimering. Eftersom processerna som pågår i biosfären är tydliga för en stor grupp experter ur andra discipliner och icke specialister krävs det tydliga logiska förenklingar som fortfarande beskriver biosfären på ett vetenskapligt intuitivt sätt.

Den största osäkerheten vid dosberäkningar finns idag i biosfärmodellerna. Den största delen av osäkerheterna beror på bristfälliga konceptuella beskrivningar av ekologiska processer, till skillnad från de oftast bättre beskrivna fysikaliska och kemiska processer som pågår i biosfären. En annan del av osäkerheten ligger i tillgången och kvaliteten på data.

Det övergripande målet med biosfärsprogrammet är att reducera osäkerheterna och med aktuella vetenskapliga metoder beräkna de ur radiologisk synpunkt viktigaste processerna i biosfären.

### 3.8.1 Förståelse och konceptuella modeller

SKB:s modelleringar av radionuklidspredning i biosfären har genomförts med BIOPATH. BIOPATH har utnyttjats både för KBS-3, SFR och SKB 91 och har successivt vidareutvecklats med bland annat insatser från SKB vilket sammanfattas i en genomgång i /3-19/. Modellkonceptet som används i BIOPATH har i stort sett övertagits i de flesta modeller som hanterar radionuklidspredning i biosfären /3-20, 3-21, 3-22, 3-23/.

Bristen på alternativa modeller och synsätt gör att en noggrann validering av underlaget är svår /3-24/ och behovet att belysa konsekvenserna för omgivande fauna och flora vid en säkerhetsanalys kräver en vidareutveckling av modellerna, se kapitel 11. Dessa modeller baseras på radionuklidflödet i hela ekosystemet och inte enbart för specifika vägar som är kritiska för människan (t ex brunn eller komjolk).

I säkerhetsanalysen SR 97 modelleras platsspecifika förhållanden vilket innebär BIOPATH-modellens uppbyggnad anpassats till lokala förhållanden. I säkerhetsanalysen har det antagits att nuklider från djupförvaret kan föras direkt till biosfärens recipienter i en årlig mängd som ges av transportberäkningarna för när- och fjärrzonen. Då dessa transportberäkningar baseras på strömrör som mynnar 20–40 m under markytan har det varit möjligt att koppla dessa utflödespunkter till ovanliggande biosfär som kan vara av olika karaktär. För modelleringen har detta medfört att den aktuella biosfären har indelats i olika klasser som har behandlats med hjälp av ett modulsystem/3-25, 3-26/.

Modeller har tagits fram för att beräkna omsättningen och exponering från utsläpp av radionuklider till sjöar, rinnande vattendrag, kustområden, myrmarker, och jordbruksområden /3-27/. Dessutom har beräkningar utförts för direkt användande av kontaminerat grundvatten (brunn). Dessa modeller har sedan använts för att beräkna exponeringen till människa i de tre platsspecifika områdena för SR 97 /3-27/.

Den högre upplösningen i detaljer kräver ett bättre dataunderlag och noggrannare beskrivning av processer vilket uppmärksammar också brister i underlaget och modeller. Modellen baserades på tillgänglig kartinformation /3-27/. Dessutom gjordes en omfattande litteraturgenomgång av platsspecifika data om biosfären /3-28/, hydrologi och lösa avlagringar /3-29/. Inför kommande platsundersökningar krävs en utvärdering av hur platsspecifika data måste vara beskaffade och en avvägning av vad olika förbättringar av mätmetoder och beräkningar ger jämfört med osäkerheterna som finns modellerna.

Dessutom identifierades brister i beskrivning av transporter från fjärrzon till biosfär samt avsaknaden av en skogsmodell, vilka beskrivs utförligare i genomgången av det allmänna biosfärsprogrammet (kapitel 11) och i processrapporten /3-30/.

### 3.8.2 Måluppfyllelse i FUD 95

I biosfärsprogrammet i FUD 95 sattes följande delmål som uppfyllts helt eller delvis:

- Kvantifiering av de osäkerheter som beror på att biosfären hela tiden förändras har redovisats i /3-28, 3-31, 3-32, 3-33/ men kommer att fortsätta i kommande program.
- Sammanställning av platsspecifika utvärderingar av kandidatplatsernas potential och begränsningar för förändringar i biosfären har redovisats i /3-27, 3-28, 3-29, 3-34/ men kräver fortsatta studier.
- Förbättrat dataunderlag som spridningsmodeller vilar på har redovisats i /3-28, 3-29, 3-35, 3-36/.
- Validering av modeller genom studier av analoga spridningsprocesser har redovisats i /3-37, 3-38, 3-39/ och kommer alltid att vara aktuellt när nya modeller utvecklas.

### 3.8.3 Mål och program för det fortsatta arbetet

Det övergripande målet för biosfärsstudierna är att kvantifiera spridningen av radionuklider och andra ämnen från djupförvaret till människans omgivning, samt de konsekvenser denna spridning medför. Mer konkret finns målen att

- utvärdera vilka parametrar som kan beskrivas med generiska data respektive platsspecifika data,
- underhålla och modernisera biosfärens modellverktyg,
- integrera biosfärsmodellerna i beräkningskedjan,
- undersöka alternativa säkerhetsindikatorer.

Biosfärsprogrammet för säkerhetsanalysen syftar till att integrera de kunskaper som tas fram inom det allmänna biosfärsprogrammet (se kapitel 11). Integrationen innebär realis-

tiska förenklingar som kan användas inom hela modellkedjan för radionuklidspridningen och analys av osäkerheter i jämförelse med andra osäkerheter i beräkningskedjan. Det innebär på lång sikt en ganska omfattande omprövning av biosfärsmodellerna konceptuella beskrivning baserad på det systemekologiska angreppssätt som beskrivs i biosfärprogrammet. Den konceptuella beskrivningen och senare den numeriska modellen baseras på en fördjupad beskrivning av biosfärens processer /3-30/.

Parallellt kommer alternativa indikatorer för påverkan av biosfären eller funktion av förvaret att testas /3-40/.

Dataunderlaget kommer också att förbättras genom de insatser som görs för att kvantifiera och modellera transportprocesser som partikelresuspension och översynen av cirkulationen i kustområdet. Studierna i gränsskiktet mellan sediment och vatten som har en kraftig påverkan på radionuklidflödet har lett till att transporthastigheterna mellan geosfär och biosfär kommer att omprövas. Vidare kommer en skogsmodul att utvecklas för beräkningskedjan eftersom skogen är det dominerande ekosystemet för de flesta tilltänkta lokaliseringar.

Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Vattenomsättning, grundvattenbildning och ytavrinning är en av de viktigaste fysikaliska faktorer som påverkar dosen. Landhöjning och klimatförändringar förändrar biosfären men påverkar också förvarets funktion. Arbetet med dessa långsiktiga förändringar i biosfärprogrammet kommer att integreras i säkerhetsanalysen endera som tidsberoende funktioner direkt i biosfärsmodellerna eller som speciella scenarier.

Modellverktygen BIOPATH och PRISM behöver fortlöpande underhåll och utveckling då nya insikter om processer tillkommer. Dessutom genomförs en sensitivitetsanalys för att testa om de nya processerna påverkar slutresultatet nämnvärt eller om osäkerheten i parametererna påverkar resultatet. Viktigt är att testa modellernas känslighet för variationen i platsspecifika parametrar. Resultatet utmynnar i en detaljerad plan över vilka variabler som måste säkerställas i platsspecifika undersökningar och vilka som kan hämtas eller beräknas ur existerande källor.

Val av radiologiska acceptanskriteria har stor betydelse för hur biosfärsanalyser skall göras. De svenska myndigheterna förväntas under 1998 att ge ut föreskrifter. Detta arbete och arbetet inom internationella grupper som IAEA (BIOMASS) och ICRP kommer att bevakas.

### **3.9 Kvalitetssäkring, datormodeller och beräkningar**

I MONITOR 2000 dokumenteras vilka datormodeller och ingångsdata som används vid en given beräkning. Versionshantering används för hela datorprogrammet PROPER och alla dess submodeller. Möjligheten att upprepa äldre beräkningar finns härmed vilket förbättrar spårbarheten. Helt identiska resultat kan dock inte alltid återskapas på grund av att datorer kontinuerligt byts ut samtidigt som kompilatorer och annan mjukvara alltid kommer att uppdateras till nyare versioner. Äldre kompilatorer kan inte garanteras fungera på nyare datorer. Detta innebär att det inte alltid går att ta fram en exakt exekverbar kopia av ett äldre datorprogram. Detta påverkar dock beräkningsresultaten endast i form av mindre avrundningsfel.

Med det nyutvecklade grafikprogrammet HYDRAVIS kan för hydrologiberäkningar såväl indata som resultat presenteras på ett tydligt sätt vilket erbjuder goda möjligheter till kontroll av indata och rimligheten i beräkningsresultat.

### 3.9.1 Mål och program

Befintliga rutiner kommer att utvärderas efter SR 97. Erfarenheter från utvecklingsarbete och produktionsberäkningar skall kontinuerligt tillvaratas bland annat i form av nya testfall för PROPER. Möjligheterna till grafisk presentation av beräkningsfall och resultat skall vidareutvecklas. Bland annat skall den geometriska struktur som används i närområdesmodellen COMP23 kunna presenteras grafiskt.

Kontrollen av spårbarhet och kvalitet i säkerhetsanalyserna kommer att följa SKB:s kvalitets- och ledningsmanualer som är utvecklade inom projekten för inkapslingsanläggning och djupförvar.

Frågor av specifikt intresse för säkerhetsanalyser är:

- Verifiering av modeller som används vid säkerhetsanalyserna genom att bygga upp en antal testfall för enskilda submodeller liksom för hela beräkningskedjan i PROPER. Testfallen skall bland annat kunna användas för att testa att nya versioner kan reproducera äldre resultat.
- Versionshantering av datormodeller och ingångsdata.
- Att utveckla system för arkivering av de exekverbara PROPER-filer som används i säkerhetsanalyser.
- Dokumentation och spårbarhet av genomförda beräkningar.



## 4 Använt bränsle

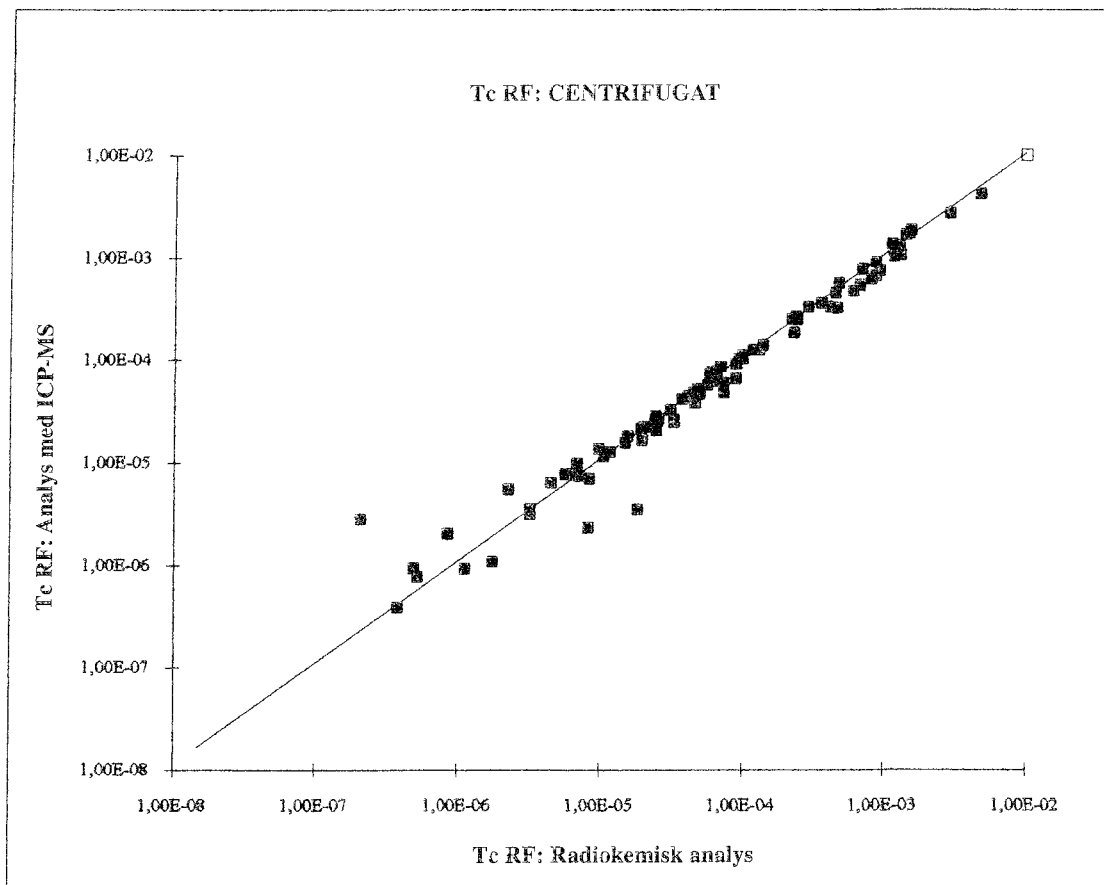
Geologisk slutförvaring av använt kärnbränsle i korrosionsbeständiga kapslar är huvudalternativet för hanteringen av högaktivt avfall i Kanada, Finland, Spanien, Sverige och USA, och övervägs också i Tyskland och Frankrike, åtminstone för vissa bränsletyper. I Sverige påbörjades redan under 1970-talet forsknings- och utvecklingsarbete som var inriktat på direktdeponering. Studier av det använda bränslets beständighet i grundvatten påbörjades 1977 och det nuvarande forskningsprogrammet fastställdes 1982. Resultaten från SKB:s bränslelakningsprogram i Studsviks "hot cell" laboratorium har givit en god förståelse av hur använt bränsle korroderar i vatten. En översikt över resultat och data som erhållits inom SKB:s program fram till 1992 ges av Forsyth och Werme /4-1/, medan senare aktiniddata från bränslelakningar behandlas av Werme och Spahiü /4-2/. I detta kapitel redovisas kortfattat de undersökningar, som gjorts för att studera inverkan av de viktigaste faktorerna på lakning av använt kärnbränsle.

### 4.1 Korrosion av använt kärnbränsle – analysmetoder

Huvuddelen av nuvarande data från korrosion och upplösning av använt bränsle kommer från sekventiella korrosionstester utförda med bränsle/kapslingssegment upphängda i grundvatten i en spiral av platinatråd. Temperaturen har varit densamma som omgivningens. Analyserna av laklösningarna har gjorts direkt med masspektrometri utan vare sig separation eller isotoputspädning. Till analyserna har använts ett instrument med en induktivt kopplad plasmakälla (ICP-MS) som ger möjlighet till multi-elementanalyser. Instrumentet har varit i drift sedan 1992. Isotopsammansättningen i bränslet har beräknats utifrån uppgifter om anrikning, utbränning och avklingning /4-3/. Efter dessa förberedelser har ett stort antal prov (ca 200) från experimentprogrammet bränslekorrosion analyserats med ICP-MS. Flera av dessa prov var arkivlösningar från tidigare provtagningar. Resultaten av ICP-MS-mätningarna för uran, plutonium, strontium, cesium och teknetium på dessa prov har jämförts med motsvarande resultat från de tidigare använda analysmetoderna /4-4/. För de tre fissionsprodukterna erhöles en tillfredsställande överensstämmelse mellan metoderna (se Fig. 4-1), men för uran och plutonium gav ICP-MS 10–20 % högre värden än de konventionella analysmetoderna. Detta jämförelseprogram har också visat att en plutoniumförlust från lösning igenom utfällning och/eller sorption hade inträffat i arkivlösningarna under förvaring.

Liksom tidigare har betydande möda ägnats åt att förbättra analysmetoderna, som är nödvändiga för att bestämma de mycket låga halterna av aktinider och klyvningsprodukter. Ansträngningar har även gjorts för att förbättra kvaliteten på analysdata. Huvudmålet för bränsleprogrammet är att föreslå och validera modeller för bränslekorrosionen. Dessa modeller kan inte bli bättre än kvaliteten på ingående data.

Ett exempel på arbete med att förbättra analysmetoder för laklösningar är ICP-MS-analyserna av aktinider. De kan förbättras betydligt genom att ta fram procedurer för s k isobar separation. Utan sådan separation bidrar till exempel både  $^{241}\text{Am}$  och  $^{241}\text{Pu}$  till samma topp i masspektrum och det är därför svårt, för att inte säga omöjligt, att utan separation analysera americium. Detta kan ske om man kemiskt separerar trevärt americium från fyrvärt plutonium. Ett alternativ är separation med hjälp av jonkromatografi. En jonkromatografisk kolonn från Dionex har under perioden installerats i Studsvik och



Figur 4-1. Jämförelse av mängd frigjort teknetium i centrifugaten bestämd genom radiokemisk analys och ICP-MS.

experimentella försök med separation av aktinider och fissionsprodukter med olika valens-tal har utförts. Planen är att i framtiden använda utrustningen både för att koncentrera lösningarna från flödeslakningsexperiment och separera de vanliga proverna främst vad gäller aktinider.

Trevärda lantanider är också av betydelse för säkerheten och med ICP-MS-metoden kan vi mäta låga halter av dessa nuklider. Det har emellertid visat sig att dessas lösligheter och speciering under förhållanden som är relevanta för ett djupförvar inte finns tillgängliga. Därför har termodynamiska data för de sällsynta jordartsmetallernas vattenspecies sammanställts och de viktigaste liganderna för granitiska grundvatten har valts ut och validerats /4-5/. Det visar sig att under det första skedet av bränsleupplösning bestäms halterna av sällsynta jordartsmetaller av upplösningen av  $UO_2(s)$  matrisen. Senare kan fasta faser av fosfater, hydroxykarbonater och karbonater komma att begränsa deras lösligheter.

För att bättre förstå och kunna modellera bränsleupplösningens processen är det värdefullt att veta hur viktiga parametrar, som pH och redoxpotential ( $E_h$ ) i laklösningen, varierar under processen. Under föregående period har in-situ mätningar av pH och  $E_h$  under lakning i "hot cell" satts igång på bränslelaboratoriet i Studsvik. Metoden använder ett datorstyrt system för potentiometriska mätningar. Experiment inne i och utanför "hot cell" har nu pågått i mer än två år. Mätssystemets stabilitet för långa tider i närvaro av det

starka strålfältet i "hot cell" har testats; pH-värden stabila inom 0,05 pH enheter/år har uppmätts i buffrade system. Arbete pågår med mätningar i destillerat vatten under oxiderande förhållanden för att följa förändringarna av pH och redoxpotential under lakprocessen.

I kommentarer till SKB:s tidigare forskningsprogram har SKI förslagit studier av bränslelakning i närvaro av korrosionsprodukter från kapseln /4-6/. Vi har därför utfört s k blank-experiment med obestrålad  $UO_2(s)$  för att testa lakning i närvaro av olika reduktanter från närområdet, som till exempel magnetit och metalliskt järn, innan experiment med bestrålat bränsle genomförs i "hot cell". Det visade sig att det inte fanns litteraturuppgifter på kinetiken för reduktion på magnetitytor av till exempel uranyljoner i karbonatlösningar. Termodynamiskt borde magnetit reducera U(VI) till U(IV), men i experimenten (med obestrålat uran) i Studsvik kunde vi inte se några effekter på halterna uran i lösning trots närvaron av magnetit. Kinetiken för reduktion av U(VI) på magnetitytor i olika media studeras nu separat (vid Barcelonas Polytekniska Universitet, Spanien).

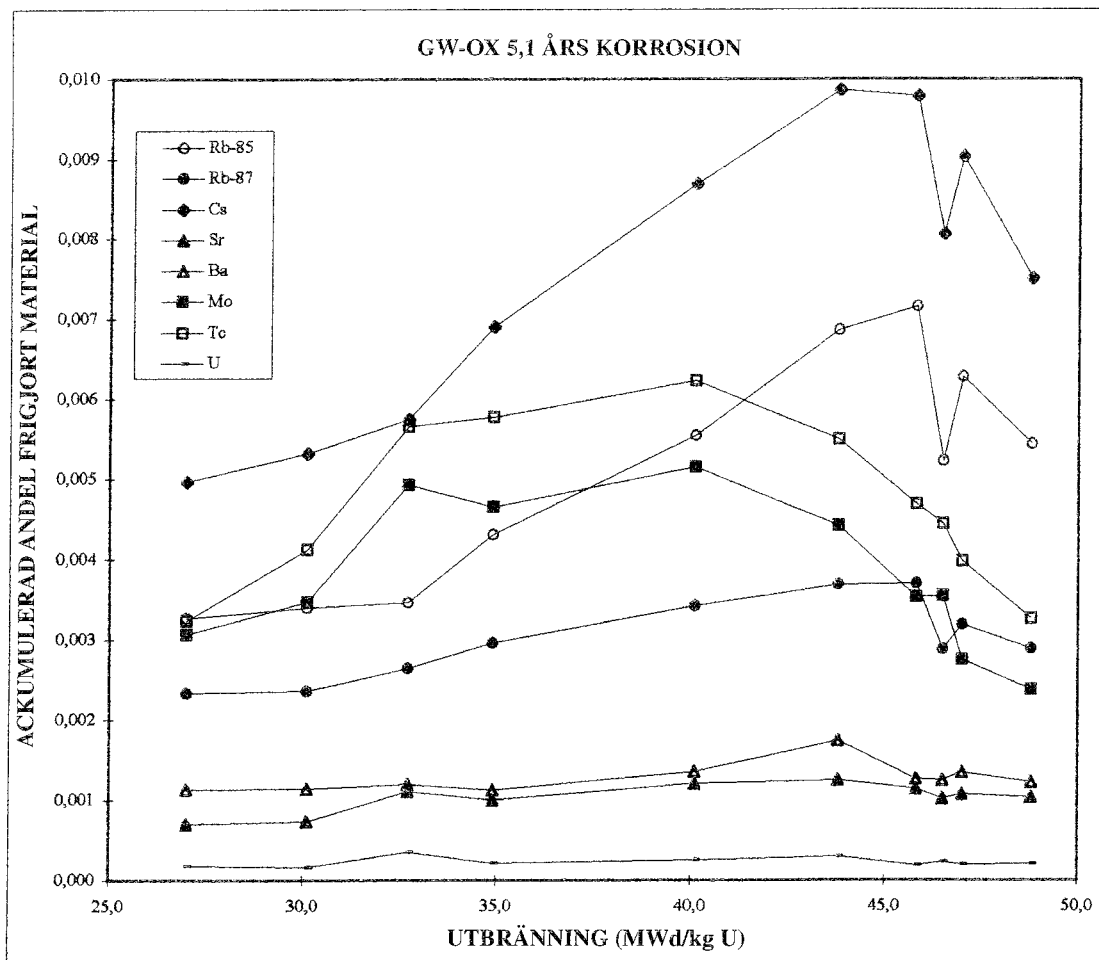
## 4.2 Matrisupplösning

Under de senaste åren har proverna från SKB:s bränslekorrosionsprogram analyserats med ICP-MS teknik kort efter att korrosionstesterna avslutats. Analyser av arkivprover från tidigare experiment har också genomförts. Tillsammans med tidigare resultat har detta gjort det möjligt att sammanställa en mycket större analysdatabas och detta har använts i en ny utvärdering /4-7/.

Några av dessa nya analysdata kommer från experiment med provbitar av bränsle (från två referensstavar, en BWR och en PWR) som har korrosionsprovats i över tio år. Huvuddelen av data kommer från 16 bränsle/kapslingsprover från en kort BWR stav som hade en utbränning i området 27,0 till 48,8 MWd/kg U. Detaljerad undersökning och karakterisering av tre andra provbitar från staven visade att proverna med hög utbränning i den här serien hade en bränslestruktur som teoretiskt borde gynna ökad korrosion. Dessa prover hade exponerats för mer än fem års korrosion under nio vattenkontaktperioder. De korrodanter som användes var ett simulerat bikarbonatgrundvatten och ett avjonat vatten. Både oxiderande och nominellt anoxiska(syrefria) förhållanden ingick i testmatrisen.

Mycket av tonvikten i utvärderingen har därför lagts på de möjliga effekterna av linjär effekttäthet och utbränning på korrosionen. Undersökningar av variationen av frigörelse-hastigheterna med vattenkontakttid av utvalda fissionsprodukter och deras totala frigörelse under fem års korrosion visade emellertid att korrosionshastigheterna under de första veckorna var lägre för prover med hög utbränning än för prover med något lägre utbränning (se Fig. 4-2). Senare kom korrosionshastigheterna att sammanfalla för alla prover. Detta har tolkats som resultatet av utbränningsrelaterade skillnader i bränslets mikrostruktur, särskilt skillnader i det sammanlänkade nätverket av porositet och korngränser, snarare än skillnader i bränslekutsarnas periferi.

En databas med alla bränslelakdata från SKB:s bränsleprogram har sammanställts under perioden. Databaskoden Access har använts och de olika förhållanden och parametrar, som skall lagras i databasen har utvärderats. Strukturen på databasen är fastställd och huvuddelen av de resultat som erhållits i SKB:s bränslelakningsprogram har lagrats. Lagring av samtliga data, sammanställning av en handbok med experimentprocedurer och beskrivning av databasen pågår fortfarande. Arbetet med att göra databasen mer användarvänlig kommer också att fortsätta.



Figur 4-2. Serie 11 korrosionstester: Ackumulerad andel frigjort material i centrifugaten från 10 GW-OX korrosionstester (9 kontaktperioder: Total korrosionstid 5,09 år).

Resultaten från bränslekorrosionstester utförda under oxiderande förhållanden tyder på att frigörelsen av  $^{99}\text{Tc}$  till lösningen sker genom upplösning av metalliska partiklar, som innehåller Mo, Tc, Ru, Rh och Pd. Storleken och sammansättningen på dessa metalliska partiklar beror av utbränning och temperatur i bränslet under bestrålningen. Prover från referensbränsle har lösts upp i koncentrerad salpetersyra och en tung rest av företrädesvis dessa metalliska partiklar har avskiljts /4-8/. Undersökningar av små prover av upplösningresterna i svepelektronmikroskop (SEM) och elektronmikrosondanalyser (EPMA) har, tillsammans med resultat från analyser av filtraten och ORIGEN-beräkningar av inventarierna av Mo, Tc, Ru, Rh, och Pd i bränslet, använts för att bestämma deras sammansättning. I upplösningstester i simulerat grundvatten med två prover från dessa rester uppmättes halter av Mo och Tc i samma storleksordning som i korrosionstester med använt bränsle.

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, 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 /4-9/. Vid mätningar med Kr-sorption erhöles reproducibla värden på arean i området 70–120  $\text{cm}^2/\text{g}$ . För flödeslakningarna har flera

PWR-bränslefragment malts och siktats, och därefter har arean på två fraktioner (0,125–0,25 mm och 0,25–0,5 mm) bestämts med Kr-BET metoden. De bränsleprover som skall användas till experimenten med flödeslakningar lagras i Ar-atmosfär.

Ett experiment, som kombinerar bränslekorrosion och radionukliddiffusion i bentonitlera, startade 1985. Flera segment av en bränslestav placerades omgivna av kompakterad bentonit i diffusionsceller. Diffusionscellerna placerades sedan i cylindrar med syntetiskt grundvatten med låg salthalt, som jämviktats med bentonit. Totalt startades tio celler. Några av cellerna hade tillsatser av metalliskt järn, metallisk koppar eller Fe(II)-mineralet vivianit(järn(II)fosfat) i leran. Experimenten utfördes med kontakttiderna 101, 197, 386 och 2213 dagar. Försöksupställningen och en del resultat har rapporterats i tidigare publikationer /4-10-4-13/.

Genom utveckling av en analysmetod för olika aktinider från ett och samma lerprov /4-14, 4-15/ har de första egentliga analyserna av aktinider i bentonitlera som varit i kontakt med utbränt kärnbränsle kunnat genomföras. På grund av överlappande spektrallinjer i såväl alfa- som masspektrometri måste aktiniderna separeras före analys. Koncentrationerna av de olika aktiniderna i bentonitleran är mycket låga, därför har utvecklingen av analysmetoden varit en förutsättning för att kunna analysera andra aktinider än americium och curium. Aktinider i analyserbara koncentrationer kan återfinnas i bentonitleran endast någon millimeter från det utbrända bränslets yta. Analyserna har avslutats och resultaten rörande aktiniders transport i bentonitlera presenterades vid konferensen Migration 97 /4-16/.

Resultaten för lakningen av uran från bränslet och urantransporten genom den kompakterade bentoniten baserades på mätningar av uranisotopen  $^{236}\text{U}$ , eftersom bakgrundshalterna av de naturliga uranisotoperna  $^{238}\text{U}$  och  $^{235}\text{U}$  var betydligt högre (omkring 8 ppm) än den mängd uran som frigjorts från bränslet. Urans apparenta diffusivitet bestämdes till  $1,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Med tillsats av metalliskt Fe till bentonitleran minskade diffusiviteten med två tiopotenser till  $3,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ , vilket skulle kunna tolkas som en reduktion av U(VI) till U(IV). Från data som erhållits efter 386 dagars kontakttid bestämdes neptuniums ( $^{237}\text{Np}$ ) diffusivitet till  $1,3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ . I sexårscellerna däremot var den uppmätta transporten mycket långsammare ( $\sim 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

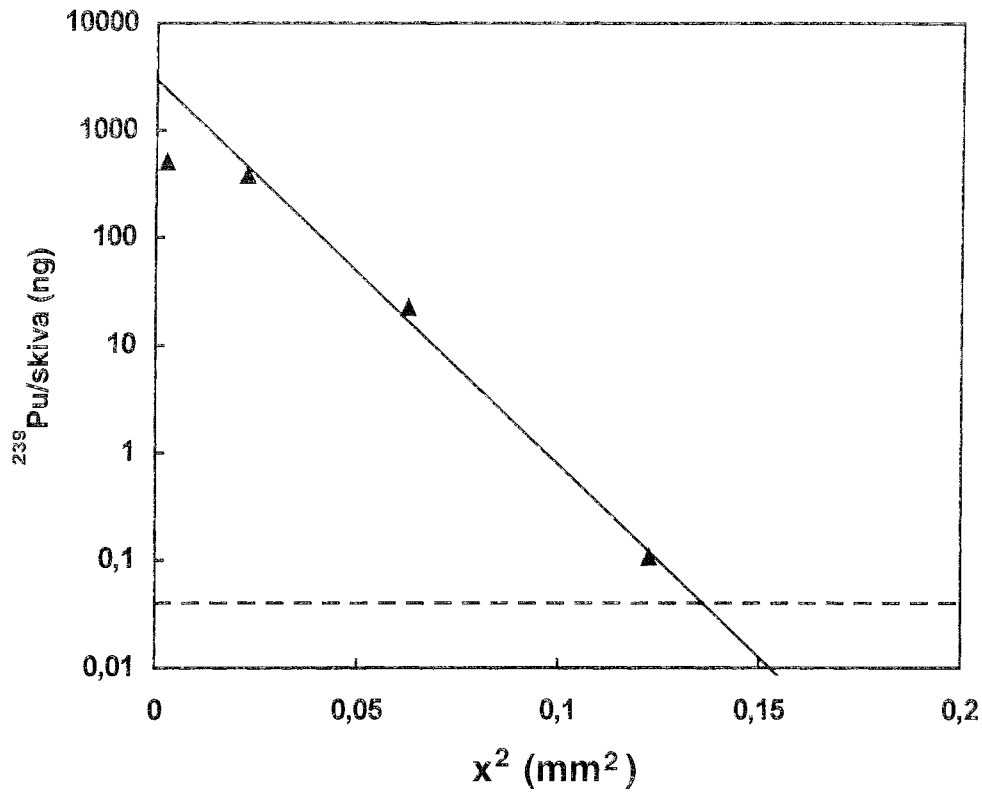
Data för lakning och diffusion av plutonium visas i Figur 4-3. Diffusiviteten för plutonium efter 6 års diffusionstid var  $2-8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ . Detta är åtminstone en tiopotens lägre än tidigare presenterade diffusiviteter ( $< 3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  /4-11, 4-17/)

Figur 4-4 visar data för diffusionen av americium efter 6 års diffusionstid. Värdet på  $D_a = 3-6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  stämmer väl med litteratordata /4-18/.

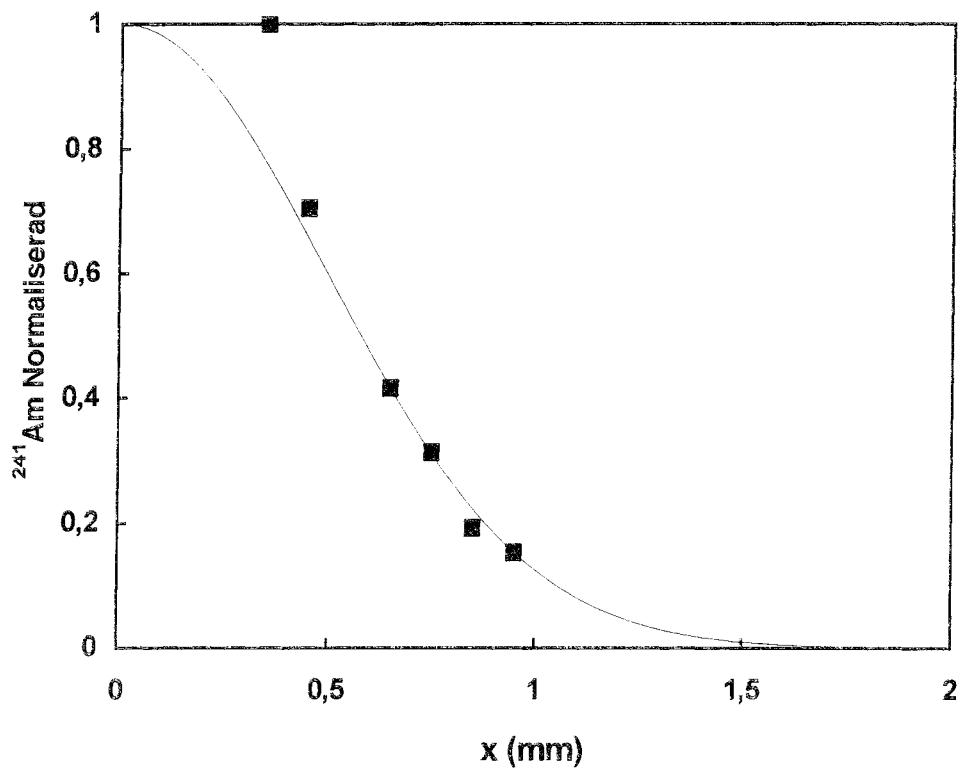
Sammantaget kan sägas att värden på apparenta diffusiviteter för aktinider som tidigare presenterats i litteraturen (se sammanställningen i /4-19/) generellt är högre med undantag för uran. Resultaten visar att den fraktion av aktinider som återfinns i bentonitleran efter 6 års kontakttid enbart utgör  $10^{-5}$ – $10^{-8}$  av andelen som finns i bränslet. Resultaten visar också att den frigjorda andelen i stort sett är densamma för uran, neptunium, plutonium och americium, vilket tyder på kongruent upplösning.

### 4.3 Radiolys

Radiolys är en mycket viktig process för bränsleupplösning, eftersom den kan störa de reducerande förhållandena i djupa grundvatten genom att producera oxidanter. Radiolys av vatten producerar ekvivalenta mängder oxidanter och reduktanter. Oxidantförbruk-



Figur 4-3. Koncentrationsprofil för plutonium efter 6 års diffusionstid. Kurvan motsvarar ett  $D_a$  på  $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ . Den streckade linjen visar detektionsgränsen.



Figur 4-4. Koncentrationsprofil för americium efter 6 års diffusionstid. Kurvan motsvarar ett  $D_a$  på  $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ .

ningen genom reaktion med bränsleytan resulterar i ett överskott av reduktanter, huvudsakligen väte. En massbalansstudie av radiolytiska oxidanter, reduktanter och upplöst uran har gjorts i ett slutet system som från början innehöll fragment av använt bränsle och syrefritt destillerat vatten /4-20/. I dessa experiment steg vätgashalten hela tiden, medan syrgashalten förblev mycket låg. Massbalansberäkningar av oxidanter, reduktanter och upplöst uran visar på ett klart underskott av oxidanter i systemet. Långtidsradiolysförsök har visat samma resultat; syrehalten stiger under en vecka till ett maximalt värde, därefter minskar den med tiden. Vätgashalten stiger hela tiden i mer än åtta månader, medan syrgashalten förblir låg /4-21/.

När man i nya experiment med initialt syrefria lösningar även tillsatte millimolarhalter av karbonat så ökade halterna av radiolysproducerat  $H_2$  och  $O_2$  kontinuerligt. En preliminär analys av experimentdata tyder på massbalans mellan oxidanter och reduktanter, när  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$  och upplöst uran tas med i beräkningarna. Det är möjligt att en mer realistisk modell för radiolytisk oxidation av använt bränsle kan utvecklas genom att ta med dessa data i den kinetiska modell som just nu håller på att utvecklas.

I en annan studie har tjockleken bestämts på det vattenskikt där gammarradiolys påverkar korrosionen av  $UO_2$ -bränsle. Det visade sig att vattenskiktet tjocklek motsvarade diffusionslängden för de bildade radikalerna /4-22/.

#### 4.4 Modeller för bränsleupplösning

Arbetet med att utveckla en modell för bränsleupplösning under oxiderande förhållanden har fortsatt under hela perioden. Den modell som utvecklas är en kinetisk modell istället för en jämviktsmodell. Det är nödvändigt eftersom det använda bränslet utgör ett dynamiskt redoxsystem. Genom radiolys bildas fortlöpande oxidanter och reduktanter vid gränssytan bränsle/vatten. De huvudprocesser som pågår i systemet är:

- Produktion av oxidanter genom radiolys av vatten. Mycket arbete har lagts ned på att beräkna produktionshastigheten av radiolytiska oxidanter för att reproducera experimentella observationer av utvecklingen av oxidanter i bränsle/vatten systemet.
- Oxidationen av  $UO_2$  i ytkoordinationspositioner med samtidig reduktion av oxidanter i systemet. Omfattande litteratursökningar och databehandlingar har gjorts för att uppskatta de mest troliga oxidationshastigheterna för bränslematrisen. Detta kompliceras av att det vanligtvis är den kombinerade oxidations- och upplösningshastigheten som rapporteras i de flesta experimenten.
- Upplösning av de oxiderade positionerna med åtföljande frigörelse av uran till lösningen. De species som bildas av uranyl i lösningen beror på systemets vattenkemi.
- Möjligheten till bildning av sekundära U(VI)-faser och deras inflytande på omvandlingen av  $UO_2(s)$ -matrisen har också beaktats. Detta gjordes genom att först göra beräkningar utan bildning av sekundära uranfaser och därefter beakta deras bildning under antagande av jämvikt mellan fast fas och lösning. Som en tredje möjlighet beaktades även kinetiken för upplösning-utfällning av de sekundära uranfaserna medan löslighetsjämvikt uppnås.

Alla dessa processer har sedan införlivats i en kinetisk modell genom att utveckla massbalansekvationer för varje komponent: oxidant, uran, oxiderade och icke-oxiderade positioner på bränsleytan. Beräkningsmodellen kallas RDC (Reducing Capacity).

Slutligen har modellen testats och kalibrerats mot data från lakexperiment med obestrålad urandioxid, mot data från använt bränsle och även experimentella data från utvecklingen av oxidanter i bränsle/vatten systemet. I alla dessa fall har en acceptabel förklaring av experimentella data för utvecklingen av urankoncentrationerna i dessa system kunnat erhållas /4-23/.

Utvecklingen av plutoniumkoncentrationerna i bränslelakexperiment med tiden har också nyligen beskrivits med RDC-modellen /4-24/. I de flesta experimenten med bränslelakning under oxiderande förhållanden så ökar plutoniumhalten under de första veckorna till mer än tio gånger lösligheten för den löslighetsbegränsande fasen och sjunker sedan långsamt ner till detta värde ( $2 \cdot 10^{-9}$  M) efter några månader. Detta beteende har modellerats med förutsättningen att upplösningshastigheten för plutonium uttrycks som en andel av upplösningshastigheten av  $\text{UO}_2(\text{s})$  matrisen, vilken är proportionell mot andelen plutonium i det använda bränslet. Plutonium upplöses huvudsakligen som  $\text{Pu}(\text{IV})$  hydroxid, vilken är en förening som är känd för sin starka tendens att bilda kolloidala partiklar. Detta förklarar de initialt förhöjda plutoniumhalterna. Den följande sammanhopningen (koaguleringen) av dessa kolloidala partiklar för att bilda amorf plutoniumhydroxid förklarar varför plutoniumhalterna förändras med tiden. Ett annat resultat av modelleringen av bränsleupplösningssdata är att löslighetsprodukten av amorf plutoniumhydroxid kunnat uppskattas till samma storleksordning som litteraturvärdet, vilket ökar modellens tillförlitlighet. Denna vidareutveckling av modellen har presenterats /4-24/ och arbetet kommer att fortsätta med att dels bestämma viktiga kinetiska parametrar och dels ytterligare förfinas modellen.

## 4.5 Naturliga analogier

Från experiment och modelleringsstudier av uranmineral som naturliga analogier för använt bränsle har en enhetlig modell för upplösning av uraniniter utvecklats. Denna modell har visat att det ursprungliga redoxillståndet för  $\text{UO}_{2+x}$  – fasen dominerar redoxutvecklingen i vattnet och därigenom också uranoxidfasens löslighet /4-25/. Långtidsstabiliteten hos det använda kärnbränslet är starkt beroende på de vägar den oxidativa omvandlingen av uranmatrisen tar.

Termodynamiska studier av sekundära omvandlingsprodukter har givit ett värde på löslighetsprodukten för becquerelit /4-26/, som tyder på att becquerelit har ett större stabilitetsområde än vad som tidigare bestämts. Nyare mineralogiska data för dessa intermediära  $\text{U}(\text{VI})$ -faser visar att de kan införliva spårelement i sina strukturer. Detta skulle kunna ha en hämmande effekt på frigörelsen av radionuklider genom radiolytisk omvandling av bränslematrisen, särskilt med hänsyn till den tidigare nämnda större stabiliteten för becquerelit. Experimenten och modelleringsstudierna av uranmineral som naturliga analoger för använt bränsle skulle kunna användas för att göra uppskattningar av korrosionen av använt kärnbränsle. En doktorsavhandling på detta ämne har också presenterats /4-27/.

Stabiliteten av  $\text{U}(\text{VI})$ -silikatfaserna soddyit och uranofan har också bestämts experimentellt. Dessa faser kan vara slutprodukterna för den oxidativa omvandlingen av kärnbränslet. För att undvika de experimentella osäkerheter, som konstaterats med naturliga prover, användes syntetiska faser, vilka framställdes i enlighet med vedertagna tillvägagångssätt. Detta har lett till en bestämning av soddyits stabilitet /4-28/. Bestämningen av lösligheten av uranofan var mer problematisk. Även med syntetiska faser och med sammansättningar på lösningar, som skulle garantera den fasta fasens termodynamiska stabilitet, var det svårt att få reproducerbara resultat.



## 4.6 Mål och program

Det övergripande målet för bränsleundersökningarna är att:

- Förstå de processer som styr frigörelsen av de olika nukliderna från bränslet.
- Fortsätta förbättra befintliga frigörelsemodeller inför kommande säkerhetsanalyser.
- Utveckla en realistisk bränslelakningsmodell inför ansökan om detaljundersökningar och bygge av djupförvar.

### 4.6.1 Löslighetsbegränsningar/upplösningskinetik

De pågående experimenten med PWR- och BWR-bränsle kommer att fortsätta med ett begränsat antal prover under perioden. Dessa experiment har nu pågått i 10 respektive 15 år. Under perioden kommer emellertid korroderat bränsle att fortsatt undersökas för att identifiera eventuella fasta faser (korrosionsprodukter) som bildats under lakningen.

Inverkan av radiolysprodukter från bränsle på redoxförhållandena i syrefria system har kunnat studerats kontinuerligt med hjälp av redoxelektroder i lakkärl med använt bränsle. Resultaten hittills visar att mätsystemen är stabila under förhållandena i "hot cell". Redoxelektrodmätningar som syftar till att ytterligare belysa betydelsen av radiolys för bränsleupplösning under reducerande förhållanden kommer att fortsätta också i närvaro av redoxkänsliga komponenter från närområdet, främst järn och järnkorrosionsprodukter.

Flödesreaktorer har utnyttjats i studier av kinetiken vid upplösning av svårösliga ämnen. Denna teknik har under perioden utprovats på Studsvik. Experimentuppställningen har testats med uran(IV)oxid för att optimera flöde och andra experimentparametrar. Den kommer att användas för bränslestudierna med syftet att bestämma upplösningshastigheter av bränsle under aeroba och anaeroba förhållanden.

### 4.6.2 Radiolys

Djupa grundvatten är syrefria. Under dessa förhållanden är urandioxid stabil och en enklare modell för löslighetsbegränsad upplösning av  $UO_2$  kan tillämpas. Bränsleupplösningshastigheten kommer att vara mycket låg på grund av den låga vattenomsättningen i kapselns närhet i djupförvaret. De syrefria, reducerande förhållandena kan påverkas och förändras av strålningen från bränslet, som genom radiolys kan tänkas skapa lokala oxiderande förhållanden nära bränsleytan. Om så är fallet måste eventuellt en modell för oxidativ upplösning av  $UO_2$  användas. Avgörande för valet av modell är storleken på effekterna av radiolysen på bränsleoxidationen.

Det arbete, som utförts av Kärnkemi KTH och Studsvik kommer att fortsätta med hög prioritet under perioden med i huvudsak två typer av experiment. Dels kommer specifika experiment under kortare tider att utföras med syftet att bestämma inverkan av karbonat på produktionen av radiolysprodukter. Dessa experiment kommer att kompletteras med grundläggande experiment med pulsradiolys, för att bestämma hastighetskonstanter för de radiolysreaktioner som ännu är otillräckligt kända. Dels kommer långtidsexperiment (1,5 till 2 år) att genomföras för att undersöka effekterna av radiolys i slutna system. Förhållandena i slutförvaret liknar mer ett slutet system än det system, som hittills kunnat studeras på Studsvik, där begränsad utläckage av radiolysprodukter inte helt kunnat förhindras.

En av de viktigaste oxidanterna, som produceras genom radiolys är väteperoxid. Därför kommer kinetiska studier av oxidation av urandioxidmatrisen med väteperoxid att startas. I säkerhetsanalysens scenarier antas i allmänhet att kopparkapseln är intakt i hundratals år. Efter den tiden är endast alfaradiolysen av betydelse. För att simulera korrosion och upplösning av mycket gammalt bränsle har alfadopad urandioxid (dvs urandioxid med en tillsats av en alfastrålande isotop t ex  $^{238}\text{Pu}$ ) syntetiserats i samarbete med ITU, Karlsruhe. Detta material kommer att användas för radiolysstudier.

#### 4.6.3 Redoxbetingelser i närområdet och redoxkinetik

Redoxbetingelser har en mycket stor betydelse för bränsleupplösningen. Processer och reaktioner som påverkar och påverkas av dessa måste därför karakteriseras. Aktinider i fyrvärd tillstånd har ofta en betydligt lägre löslighet än fem- eller sexvärda aktinider. Påverkan av potentiella reduktanter som järn och järnkorrosionsprodukter, som till exempel magnetit, på bränsleupplösningen skall börja att undersökas under perioden.

Eftersom uranoxid kan fällas ut då upplösta uranyl-specier kommer i kontakt med stål, skall studier av kinetik för redoxreaktioner mellan olika oxiderade aktinid-specier och uranoxid påbörjas under perioden. En annan potentiell reduktant är vätgas som bildas i stora mängder i en skadad kapsel både vid radiolys men framförallt vid korrosion av järnet i kapslarna. Vid omgivningstemperaturen kan väte visserligen bara reducera i närvaro av en lämplig katalysator, men det finns uppgifter i litteraturen /4-29, 4-30/ att  $\text{UO}_2(\text{s})$  ytan skulle kunna aktivera väte. Påverkan av höga vätetryck på bränsleupplösningen skall börja undersökas under perioden.

#### 4.6.4 Löslighetsundersökningar av fyrvärda aktinider

Grundläggande kemiska data för flera aktinider saknas eller är bristfälliga. Speciellt är det fallet med lösligheten av aktinider med oxidationstal IV i oxidform vid neutralt till basiskt pH. Denna brist i grundläggande data påpekades också av SKI i utvärderingen av SKB:s forskningsprogram FUD 95 /4-6/. Under perioden startas därför ett långsiktigt forskningsprogram för att undersöka lösligheten av fyrvärda aktinidoxider från undermättnad. Samtidigt genomförs oxidationstalspeciering och karakterisering av fasta faser. För tolkning av löslighetsdata kommer speciell tonvikt att läggas på undersökning av kinetik för:

- upplösningen,
- redoxreaktioner och disproportionering av olika oxidationstal,
- förändring i fast fas (övergång kristallin-amorf på grund av stark egenstrålning).

Genomförandet innebär framställning och karakterisering av relevant fast fas, samt utveckling av experimentell teknik för oxidationstalspeciering och karakterisering av fast fas. Eftersom aktinid(IV)oxider förväntas vara mycket svårslösliga vid neutrala pH, måste analysmetoder för analys av extremt låga aktinidhalter utvecklas.

#### 4.6.5 Modeller för bränsleupplösning

Arbetet med att utveckla modeller för bränsleupplösningen kommer att fortsätta. Utvecklingen kommer att styras mot att integrera mekanismerna och takten för bildandet av radiolytiska oxidanter med effekter av oxiderande skikt och med kinetiken för deras förbrukning.

Under perioden kommer arbetet att fortsätta med mer långsiktig utveckling mot en realistisk modell för bränsleupplösning under reducerande förhållande i närvaro av radiolys. Genom att nya analysmetoder givit pålitliga data, även för nuklider som tidigare inte kunnat analyseras, kommer arbetet fortsättningsvis att utvidgas till att omfatta betydligt fler nuklider.

#### **4.6.6 Modellvalidering genom naturliga analogier**

Efter att Oklo-reaktorn var aktiv, har flera olika händelser inträffat i reaktorzonerna och i de närliggande områdena. För att bestämma i vilken utsträckning den information, som kommer fram ur Oklo-projektet, kan tillämpas på och användas för validering av bränsleupplösning- och transportmodeller är det väsentligt att tidsskalan för dessa senare händelser fastställs och att den påverkan de kan ha haft på den nuvarande situationen bestäms. Detta kommer att utföras inom ramen för Oklo-projektet.

### **4.7 Kompetenshållning**

#### **4.7.1 Studsviks laboratorium HCL**

Studsviks "hot cell" Laboratorium (HCL) är ett unikt forskningscentrum av central betydelse för SKB:s bränsleprogram inte enbart för att det är den enda platsen i Sverige, där experiment med bränsle kan göras utan också för den mängd experimentella tekniker, analytiska metoder och mätprocedurer som används och utvecklats – i många fall under genomförandet av det aktuella forskningsprogrammet. Några av dem är utvecklade för att svara mot ett behov i programmet och är på så sätt unika också i ett internationellt perspektiv. Utöver detta är HCL Studsvik en forskningsresurs även för den forskargrupp på KTH, som genomför radiolysundersökningarna och för forskarlaget på CTH, som studerar bränslelakning i närvaro av bentonit och som även gör aktinidkemiskt arbete. Det är i programmets intresse att upprätthålla och kontinuerligt utveckla de vetenskapliga kompetens, som finns vid detta forskningscentrum i Studsvik.

#### **4.7.2 Kärnkemi**

På grund av det bestrålade kärnbränslets natur är kärnkemiinstitutioner av största vikt för programmet. De är de enda svenska institutioner som kan bidra direkt med data för programmet (på andra ställen kan bara analoger till utbränt bränsle och dess komponenter studeras). De två kärnkemiska institutionerna i Sverige täcker var för sig viktiga delar av bränsleprogrammet.

## 5 Kapselmateriel

Kapselns förmåga att isolera avfallet är viktig för den långsiktiga säkerheten och det finns ett antal krav som kapseln måste uppfylla /1-1/. Konstruktionsförutsättningarna för kapseln för använt bränsle redovisas i en separat rapport /1-2/. Förslutning av kapseln och oförstörande provning kommer att utvecklas vid Kapsellaboratoriet /1-1/. Pågående utveckling av kunskapen och vidare provning av modeller för korrosion av material i kapseln kommer att fortsätta, bland annat genom försöken i Äspölaboratoriet (se avsnitt 14.4.5).

### 5.1 Korrosionsprovning, koppar

Den termodynamiska databasen för koppar revideras. Detta arbete avslutas under 1998. Diskussioner har inletts om eventuell experimentell komplettering av data, speciellt högtemperaturdata, om litteraturgenomgången skulle visa att detta kan komma att vara nödvändigt.

Gropfrätning på koppar studeras med bland annat en pilotundersökning under 1998. Ytterligare experimentella studier kommer att påbörjas under hösten 1998 och fortsätta i en första etapp under 1999. Arbete med att validera modellen för gropfrätning kommer att påbörjas under 1999.

Bakteriell korrosion av koppar kan tänkas ha betydelse för kapselns livslängd. Pågående studier av bland annat bakteriers överlevnad i bentonit beräknas vara avslutat i sin nuvarande etapp till 1 juni 1999. Resultaten från det arbetet kommer att styra om och i vilken form arbetet skall fortsättas.

Spänningskorrosionssprickning har identifierats som ett viktigt område för ytterligare studier. Experimentella undersökningar av spricktillväxthastigheten vid spänningskorrosion pågår vid KTH, Institutionen för Materialvetenskap. Detta arbete kommer att pågå under större delen av perioden och kan komma att kompletteras med andra experimentella undersökningar.

En litteraturstudie av tänkbar *korrosion på kapslar före deponering* genomfördes under 1997. Studien kommer att kompletteras med experimentella undersökningar av dels korrosion i realistisk atmosfär i Äspölaboratoriet och dels prover, som exponeras för kompakterad bentonit efter flera månaders atmosfärisk exponering. Dessa experiment kommer att genomföras i Äspölaboratoriet.

Ett program för *korrosionsprovning i realistisk miljö* kommer att genomföras i Äspölaboratoriet under nästa treårsperiod. Undersökningarna kommer att innefatta exponeringar i vattenmättad syrefri bentonit, reducerande djupvatten och även spänningskorrosionsprovning.

### 5.2 Korrosionsprovning, gjutjärn

I samband med en eventuell vatteninträning i kapseln kommer gjutjärnsinsatsen att korrodera under vätgasutveckling. Detta leder till att korrosionsprodukter (magnetit) bildas i spalten mellan koppar och gjutjärn och, på grund av magnetitens lägre densitet,

en tryckuppbyggnad innanför kopparkapseln. I förlängningen kan detta tänkas leda till att en liten skada på kopparkapseln förvärras. Analyser av korrosionsförloppet och konsekvenserna av det bygger på ett antal antaganden som oftast inte är experimentellt belagda. Det är därför viktigt att försöka studera korrosionen i en spalt mellan järn och koppar och om möjligt få ett mått på de krafter som kan orsakas av de svällande korrosionsprodukterna.

En första etapp innehåller konstruktion av apparater för korrosionsprovningen och om experimenten ger önskat resultat kompletteras programmet med analyser av korrosionsprodukter och experimentell bestämning av korrosionsprodukternas mekaniska egenskaper.

### **5.3 Materialprovning**

Krypprovning av svetsmaterial pågår på Institutet för Metallforskning. Dessa fortsätter med långtidsprovningar. Provning av material från tillverkning och svetsning av fullskalekapslar från Kapsellaboratoriet kommer att pågå kontinuerligt under den närmaste treårsperioden.

Teoretisk analys av fosforlegering av svavelhaltig koppar pågår vid Fysikum, Uppsala Universitet. En första etapp rapporterades under maj 1998 och arbetet kommer att fortsätta under 1999 i en andra etapp. Arbetet kommer att kompletteras med experimentella studier.

Fördelningen av fosfor och svavel i syrefri koppar studeras även vid Fysiska Institutionen vid Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet har haft karaktären av mindre punktinsatser, där framförallt den analysutrustning som finns tillgänglig på CTH utnyttjats. Ytterligare insatser i samma omfattning som tidigare är planerade även för 1999.

Hållfasthets- och temperaturberäkningar för kapseln har genomförts. Beräkningarna har visat att det finns behov av experimentell validering i fullskaleexperiment. Detta kommer i en första etapp att genomföras i full skala i laboratorium och kan till exempel ske i Äspölaboratoriet i prototypförvaret. Ytterligare beräkningar kan också komma att krävas för att stimulera den långsamma pålastningen när bentonitens svälltryck långsamt byggs upp.

### **5.4 Oförstörande provning**

Ett program för utveckling av utrustning och programvara för ultraljudprovning av svetsar i koppar pågår vid Teknikum, Uppsala Universitet. Huvudinriktningen är utveckling av system för provning med "phased array" och programvara för brusreduktion. Programmet kommer att fortsätta under 1999 med samma omfattning som under 1998. Arbeta med att verifiera utrustningarna för oförstörande provning kommer att definieras i samråd med Kapsellaboratoriet.

## 6 Buffert och återfyllning

Smektitrik lera, som finns i mycket stora kvantiteter världen över i form av bentonit, föreslogs som buffert mellan kapsel och berg redan i KBS-1-konceptet som definierades på 70-talet. Att bestämma bentonitens egenskaper har därför fortlöpande varit en central uppgift.

Problemet med att kunna värdera buffertens och återfyllningens funktion är att de undergår förändringar med tiden. Det gör det angeläget att identifiera processer som leder till omvandling och upplösning av smektitmineralen och att kartlägga sekundära processer i form av utfällning av cementserande substans.

### 6.1 Funktionskrav

#### 6.1.1 Krav på buffertfunktioner

Valet av buffertmaterial baseras på följande krav:

1. Hydrauliska konduktiviteten bör vara så låg att eventuell transport av korroderanter och radionuklider sker enbart genom diffusion.
2. Gasgenomsläppligheten skall vara tillräcklig om det skulle bildas stora mängder gas i kapseln och gasgenomgången får inte leda till kvarstående genomsläppliga kanaler eller hålrum i bufferten.
3. Svällningstrycket skall 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.
4. Deformerbarheten skall inte vara större än att kapslarnas läge behålls men heller inte mindre än att bergrörelser kan tas upp utan att de skadas.
5. Kolloidala partiklar skall filtreras av bufferten.
6. De termiska egenskaperna (värmeledning) får inte leda till oacceptabla fysikaliska och kemiska förändringar av bufferten.

#### 6.1.2 Buffertegenskaper som ger önskad funktion

De specificerade kraven innebär att ett antal erforderliga buffertegenskaper preliminärt kan definieras:

##### *Hydraulisk konduktivitet*

Buffertens huvuduppgift är att garantera att diffusion är den dominerande transportmekanismen runt kapslarna. Med en MX-80 buffert med en densitet av  $2000 \text{ kg/m}^3$  är transportkapaciteten för diffusion minst 10 000 gånger högre än den för advektion.

### ***Jondiffusionsegenskaper***

Bentoniten har mycket gynnsamma egenskaper när det gäller att begränsa utläckaget av radionuklider från en defekt kapsel. Effekten är dock mycket starkt beroende på den individuella nuklidens egenskaper (diffusivitet, sorptionskoefficient och halveringstid) samt närområdets geometri (defekten i kapseln, transportvägar in i berget). Detta medför att inga specifika krav kan ställas på bufferten när det gäller jondiffusionsegenskaper.

### ***Gaskonduktivitet***

Bufferten får inte ha egenskaper som kan äventyra funktionen hos de andra barriärerna. Detta innebär att vätgas, som bildas vid korrosion av järninsatsen i en defekt kapsel, måste kunna ta sig ut utan att skapa oacceptabla tryck. De försök som har genomförts i SKB:s regi visar att bentoniten öppnar sig vid ett övertryck som är lika med svälltrycket.

### ***Svällningsegenskaper***

Svällningsförmåga erfordras hos bufferten för att fylla utrymmet mellan kapsel och berg och för att ge självvätning av öppningar som kan orsakas av termiska och tektoniska effekter. Erforderlig expansionsförmåga hos bufferten uppskattas motsvara ett minsta svällningstryck av ca 1 MPa, vilket förutsätter en densitet av minst 1900 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 som följd av förskjutningar i berget. Den uppåtriktade expansionen kan ge lyftning av tunnelgolvet med sprickvidgning och kraftigt ökad hydraulisk konduktivitet som följd /6-1/.

Förskjutningar i berget kan ske i form av tektoniskt eller termiskt betingad skjuvning av sprickor som skär genom deponeringshålen. Horisontella sprickor belägna på halva kapselhöjden utgör det mest kritiska fallet. Praktiska försök med MX-80 lera med en densitet upp till ca 2050 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 /6-1/.

### ***Mikrobiella egenskaper***

Bakterietillväxt har visat sig kunna ske i MX-80 buffert med en densitet av upp till 1700 kg/m<sup>3</sup> vid vattenmättnad medan 1900 kg/m<sup>3</sup> inte medger någon möjlighet till överlevnad eller reproduktion av bakterier av det slag som undersökts i SKB:s forskningsarbete /6-2/. Det innebär att den sistnämnda densiteten kan ses som lägsta lämpliga densitet.

### ***Termiska egenskaper***

Förmågan hos bufferten att överföra värme från kapslar till berg har betydelse främst genom att för lågt värmeledningstal ger hög bufferttemperatur. Det medför snabbare

lösning av smektitinnehållet och ett ångtryck som kan leda till utträngning av vattenånga från bufferten genom överliggande tunnelåterfyllning. För att minimera negativa effekter av hög temperatur och för hög temperaturgradient har högsta bufferttemperatur satts till 100°C enligt grundkonceptet.

### **Buffertdensitetsval**

Under den gångna FUD-perioden har SKB dragit slutsatsen att buffert bestående av MX-80 efter vattenmättnad bör ha en densitet av 1900–2100 kg/m<sup>3</sup> baserat på ovanstående resonemang.

### **6.1.3 Krav på återfyllningsfunktioner**

Deponeringstunnlarna utgör konduktiva vägar i berget som starkt påverkar vattenomsättningen i förvaret om de inte återfylls med material som har en hydraulisk konduktivitet som är jämförbar med bergets. En princip är därför att använda en fyllning med mycket låg genomsläpplighet där berget är tätt och mera genomsläppligt material där tunnarna genomskärs av sprickzoner. Där kan man också bygga in genomsläppliga partier som dräneras under fyllningsarbetet så att vattentrycket hålls nere och piping och erosion undviks.

En annan princip är att inte ha specificerade krav på återfyllningens täthet utan begränsa axiellt flöde i tunnarna genom att utföra täta pluggar i strategiska positioner. I båda fallen måste man ta hänsyn till den skadade zonen runt tunnarna. För att hindra vattenomsättning kan man bygga pluggar i lämpliga lägen och fälla in dem i berget för att eliminera strömning runt pluggarna.

Även med pluggar, som med fördel kan byggas där berget är sprickfattigt och vid sprickzoner, är det angeläget att i näraliggande tunnelavsnitt välja expanderande återfyllning för att ge aktivt stöd för tak och väggar hos tunnarna. Härigenom undviks den successiva uppluckring av berget som annars leda till ökning av belastningen på pluggarna. Följande generella krav ses idag som rimliga för återfyllnaden:

- Deformerbarheten (kompressibiliteten) skall inte vara större än att expansionen uppåt av bufferten i deponeringshålen minimeras.
- Återfyllningen bör inte ge betydelsefull kemisk påverkan på bufferten.
- Där återfyllningen skall begränsa grundvattenströmningen kommer specifika krav på hydraulisk konduktivitet och svällningstryck att formuleras.

För att undvika en kemisk påverkan på bufferten bör återfyllningen ha obetydligt innehåll av kalibärande, karbonatrika och svavelbärande mineral. Det innebär ringa tillförsel av kalium, som bestämmer omvandlingen av smektit till illit /6-3/, samt av kalcium, som dels leder till att leran får sämre svällbarhet dels till att anrikning av t ex gips sker vid kapselytorna. Svavelmineral kan ge upphov till fritt svavel som bidrar till gipsbildning och som påverkar korrosionen av kapslarnas kopparhöljen. Återfyllning med smektit och kvarts som huvudkomponenter är särskilt lämpliga.



### 6.1.4 Krav på närberget för byggharhet

De viktigaste kraven gäller diskontinuiteter, dvs i praktiken sprickor med stor utsträckning, som är vattenförande och kan undergå skjuvning. För dessa gäller:

- Diskontinuiteterna som skär deponeringshål bestämmer bergets stabilitet och möjligheten att anbringa buffert och återfyllning. Vatteninflödet måste vara begränsat för att möjliggöra applicering av bufferten. Möjligheten att genom injektering åstadkomma tillräcklig tätning i appliceringsfasen kvarstår dock.
- Starkt vattenförande diskontinuiteter som skär genom deponeringstunnlar kan orsaka så starkt vatteninflöde att lerrika tunnelåterfyllningar inte kan anbringas utan speciella åtgärder, t ex tätinjektering.

## 6.2 Vunna kunskaper under den gångna FUD-perioden

### 6.2.1 Grundläggande kunskap

Naturliga bentoniter har väsentligt lägre hydraulisk konduktivitet och gasgenomsläpplighet än en tillverkad buffert med samma densitet /6-4/. Det beror på att den mikrostrukturella homogeniteten är betydligt bättre hos de naturliga lerorna bland annat på grund av krypning till stabila partikellägen under lång tid. Det artificiellt åstadkomna buffertmaterialet består av bentonitkorn som pressats samman så att ett kanalliknande porsystem kvarstår. Detta system fylls vid bevätning helt eller delvis av lergel som bildas av partiklar som frigörs från kornen. Kanalsystemet utgör en mer genomsläpplig del av bufferten än de utsvallda kornen, som delvis behåller sin ursprungliga höga densitet /6-3/. Vatten och gas tränger därför igenom bufferten med större lätthet än i naturliga leror.

Det är sannolikt att också den artificiellt framställda bufferten i ett långt tidsperspektiv får ökad homogenitet på grund av ackumulerade rörelser av molekyllär storlek. Det kan illustreras med användning av den mikrostrukturella modell (GMM) som under perioden utvecklats så att man kvantitativt kan beskriva de förändringar i kornarrangemang som sker från kompressionen av buffertblocken till det fullt vattenmättade, mognade stadiet /6-5/.

Åtskilliga processer samverkar i bufferten, t ex samtidig inverkan av temperatur, hydrologi och mekanik (THM). Förståelsen av sådana funktioner har ökat väsentligt bland annat som följd av internationell samverkan /6-6/. Samma sak gäller kemiska förändringar, t ex illitiserings genom upptagning av kalium i bufferten från omgivande berg och återfyllning. En annan kemisk process, som väsentligen rör inverkan av pH, är den som äger rum där betong är i kontakt med smektitisk lera som ingår i återfyllningen. Denna fråga har behandlats experimentellt i hydrotermaltester och utveckling av teoretiska geokemiska modeller pågår i internationellt samarbete.

Arbetet med att identifiera och karakterisera buffert- och återfyllningsmaterial har samlats i SKB:s Arbetsrapportserie under namnet "Bentonite and Backfill Handbook" som successivt uppdateras /6-3/. Denna verksamhet har primärt varit att bestämma viktiga fysikaliska och kemiska egenskaper hos smektitiska material som finns tillgängliga kommersiellt i mycket stora mängder internationellt. Vidare har det varit angeläget att utveckla och anpassa laboriemetoder och fältförsök med syfte att normera provningsförfaranden för buffert och återfyllningsmaterial. För att förstå inverkan av viktiga parametrar på deras funktionssätt, t ex densiteten och porvattenkemin, har parallellt härmed konceptuella och

teoretiska modeller utvecklats. De är kopplade till mikrostrukturella processer och gör det möjligt att förutse förändringar hos praktiskt betydelsefulla egenskaper som följd av t ex densitetsförändringar, jonbytesprocesser och gasgenomgång.

### 6.2.2 Teknikutveckling

Omfattande provning och utveckling av teknik för framställning av praktiskt utformad buffert och återfyllning har ägt rum. Man kan nu framställa högkompakterade (100 MPa) kubikmeterstora buffertblock både med isostatisk och enaxlig pressteknik och de kan ges formen av cylindrar eller ringar för rationell hantering /6-7/. Hållfastheten hos sådana block, som bestäms av strukturella defekter i mikro- och makroskala, testas i pågående arbete.

För rationell inplacering och packning av återfyllning har försök gjorts i Äspö med material med olika lerhalt och ballasttyp. Det har lett till att tekniken med horisontell utläggning och packning till drygt halva tunnelhöjden och insprutning av översta delen övergivits. Skälet är att inströmning av vatten ger praktiska svårigheter bland annat i form av uppluckring. En teknik med anbringande och packning i slänt från golv till tak bedöms nu vara den förmånligaste, men problem genom vatteninträngning kan ändå uppkomma och olika metoder för att komma tillrätta med bland annat erosion prövas, t ex inbyggnad av dränerande lager /6-8/.

Metoder för fritagning av kapslar har undersökts och flera förfaranden förefaller möjliga, bland annat disintegrering av bufferten. Denna metod, som lämpar sig på grund av buffertens mikrostrukturella uppbyggnad och ytkemi har prövats experimentellt i laboratorieskala och syns ge möjlighet till relativt snabb friläggning. Den har formen av att kalcium- eller natriumkloridlösning sprutas på bufferten som härvid disintegreras och pumpas bort i ett slutet system där lermaterialet extraheras och saltlösningen recirkuleras /6-9/.

### 6.2.3 Samverkan med omgivning

Samverkan mellan buffert, närfältberg, kapslar, återfyllning och betongpluggar har undersökts och utveckling av konceptuella och teoretiska modeller för buffertens och återfyllningens bevätning pågår. Resultatet från BMT-försöket i Stripa-projektet /6-10/, som visar att bergstrukturen och buffertens initiala tillstånd starkt påverkar hastigheten hos buffertens vattenupptagning, kommer att analyseras i detalj för att reda ut orsakssammanhanget.

Påverkan på kapslar av förskjutningar utmed diskontinuiteter som skär genom deponeringshål bestäms delvis av buffertens deformationsegenskaper. Det finns experimentellt och teoretiskt stöd för att anta att decimeterstora skjuvrörelser utbildade under några tiotals sekunder inte åstadkommer kapselbristning /6-1/.

När det gäller återfyllningen visar erfarenheterna från pågående tunnelfyllningsförsök i Äspö att inrinningen kan orsaka problem med piping och erosion i lerigt material i samband med anbringandet. Den avgörande frågan, som delvis utretts, är vilket lerinnehåll och densitet som återfyllningen bör ha för att ge erforderligt stöd för tunnarnas tak och väggar. Den sammanhänger med vilka krav man ställer på vattenomsättningen i tunnarnas närmaste omgivning och hur täta pluggar bör utformas med hänsyn till långtidsbeständigheten.

Inverkan av salt grundvatten på bentonitens svälltryck har undersökts ytterligare. Verifierande laboratorieförsök har genomförts /3-2/. Olika modeller för beräkning av svälltryck i bentonit prövades. Det visade sig att endast den termodynamiska modellen hanterade effekten av måttligt salta grundvatten med hygglig noggrannhet. Vid höga salthalter underskattade samtliga modeller svälltrycket i jämförelse med laboratoriemässigt uppmätta resultat, men införande av: 1) en intern osmotisk term och 2) jämviktsberäkningar där hänsyn tas till bentonitens laddningskompenserande katjoner (Donnan-exklusion), gav god överensstämmelse mellan termodynamiskt beräknade svälltryck och uppmätta värden för alla salthalter. Den "nya" termodynamiska modellen ger underlag för en delvis förändrad och mindre konservativ syn på buffertens egenskaper vid höga salthalter. Bufferten förväntas utveckla svälltryck vid alla tänkbara salthalter (även mättad saltlösning) och endast marginella skillnader förväntas mellan natrium- och kalciumrikt grundvatten. Däremot förväntas bentoniten i återfyllningen vara känsligare för höga salthalter som följd av den relativt låga bentonitdensiteten. Detta måste beaktas vid val av återfyllning och de krav som kan ställas på dess funktion.

#### 6.2.4 Funktion i djupförvar

I djupförvaret kommer berggrundens spänningssituation och deformerbarhet att påverka buffert och återfyllning både i byggfasen och i ett långtidsperspektiv. Deponeringshålens stabilitet är en fråga som delvis är klarlagd och som har stor betydelse för val av hållägen. Det piezometriska tryckets uppbyggnad i byggfasen kommer att påverka risken för erosion och piping och bevätningshastigheten hos buffert och återfyllning. Grundvattnets kemiska sammansättning kommer att påverka vattenmättnadsprocessen särskilt i återfyllning med låg lerhalt på ett sätt som är under utredning.

Den viktigaste processen är temperaturökningen hos buffert och närfältberg. Grundkonceptet förutsätter ofullständigt mättad buffert och det kan leda till vattenomsättning i ångform med åtföljande saltanrikning och ångpåverkan på lerinnehållet. Sådana effekter kan minimeras genom användning av buffertblock med hög vattenmättnadsgrad för vilket teknik nu finns tillgänglig /6-11/.

#### 6.2.5 Val av och tillgång till buffertmaterial

SKB:s referensmaterial, MX-80 Volclay har en smektithalt av minst ca 70 % men den varierar bland annat därför att materialet tas ut från relativt tunna bentonitlager med stor utbredning och varierande bildningsbetingelser /6-3/. Ett av skälen för att denna lera valdes som referens är att det dominerande adsorberade jonslaget är Na som ger bättre expanderbarhet än då Ca och Mg upptar jonbytespositionerna, vilket är fallet för de flesta europeiska bentoniter. Dessa konverteras till Na-form i industriell skala genom soda-behandling, vilket leder till en viss anrikning av kalcit eller dolomit.

Eftersom konduktivitetskraven uppfylls också av leror med lägre smektithalt och dessa lättare uppfyller villkoret för högsta svälltryck, kan något lermaterial med en halt av expanderande mineral av ca 50 % komma ifråga. Sådana leror med Na som dominerande adsorberad katjon finns i bland annat Danmark och Nordtyskland /6-3/. De utgör där mycket mäktiga och homogena lersediment; upp till 100 m lagertjocklek har uppmätts. När det gäller accessoriska mineral av betydelse för buffert- och kapsellivslängden, t ex sådana som innehåller kalium respektive svavel, är de jämförbara med MX-80. Under den kommande FUD-perioden kommer sådana material att undersökas.

## 6.3 Beräkningsmodeller

Genom ett EU-projekt har modellutveckling skett på tre områden som är särskilt viktiga för att förklara och förutsäga processer av fysikalisk/kemisk art. Ett av områdena gäller den mikrostrukturella uppbyggnaden hos buffert och backfill med början från kompakteringsskedet och vidare under tiden då vattenmättnad och homogenisering äger rum. Olika densitet och elektrolytinhåll har antagits för att belysa ändringar i porstorleksfördelning och andel rörligt och bundet vatten. Modellen, som nu finns i 3D-form, ger underlag för förklaring och kvantitativ beräkning av hydrauliska förlopp och diffusiv jontransport samt gasgenomgång. Vidareutveckling av modellen sker för att täcka in också reologiska funktioner som t ex skjuvning och svällning.

I ett annat EU-projekt pågår koppling av termo-hydro-mekaniska funktioner. Detta arbete utgör en fortsättning på de undersökningar som påbörjades redan i föregående FUD-program i form av en THM-modell baserad på numeriska koden ABAQUS. Modellen har vidareutvecklats och under perioden börjat tillämpas på praktiska fall, bland annat PNC:s buffertförsök i underjordslaboratoriet i Kamaishi i Japan /6-6/. Se även FEBEX-försöken (avsnitt 14.4.5).

Utnyttjande av högkompakterad bentonit som O-ringstättning av betongpluggar i tunnlar planeras i fältförsök i Äspö och sådana pluggar kan också få användning som temporära förslutningar i ett slutförvar. Placeringen och utformningen av pluggar av den typen har undersökts genom användning av numeriska modeller av den kopplade hydrauliska funktionen av bergmassa, störszon och bentonitförsedd betongplugg /6-12/. På så sätt har man fått underlag för att välja lämplig utformning av förtagningar i berget och av geometri och läge hos pluggar i berg med olika strukturell uppbyggnad.

## 6.4 Transportprocesser

### 6.4.1 Hydrauliska processer

Den mikrostrukturella modelleringen har givit en ökad förståelse av mekanismerna för vattenflöde, jonvandring och gastransport i buffert och återfyllning. När det gäller flöde visar modellerna att vattnet är rörligt endast i en ringa del av ett tvärsnitt genom buffert med den densitet i vattenmättat tillstånd som kan komma ifråga, dvs 1900–2100 kg/m<sup>3</sup>. Den hydrauliska gradienten har stor inverkan på hydrauliska konduktiviteten och Darcys lag har begränsad giltighet /6-5/. Vid de mycket låga gradienter som råder i ett slutförvar i fortvarighetstillstånd sker överhuvudtaget inget flöde genom bufferten. Hydrauliska konduktivitetsens skalberoende, en fråga av särskild betydelse för tunnelåterfyllningen hydrauliska funktion, kan beskrivas med hjälp av enkla statistiska uttryck om man känner konduktiviteten hos de enskilda elementen /6-5/.

En process av stor betydelse vid buffertens vattenmättnad och som getts matematisk form i THM-modellen, är strömning vid ofullständig vattenmättnad. Denna fråga, som kommer att behandlas med hjälp av de utvecklade mikrostrukturella modellerna, kan idag bara behandlas empiriskt.

Ytterligare en process av liknande art och betydelse är transport av vatten i ångform. Den modelleras som en diffusionsprocess med temperaturgradienten och ångtrycksgradienten som drivkrafter /6-5/.

### 6.4.2 Jondiffusion

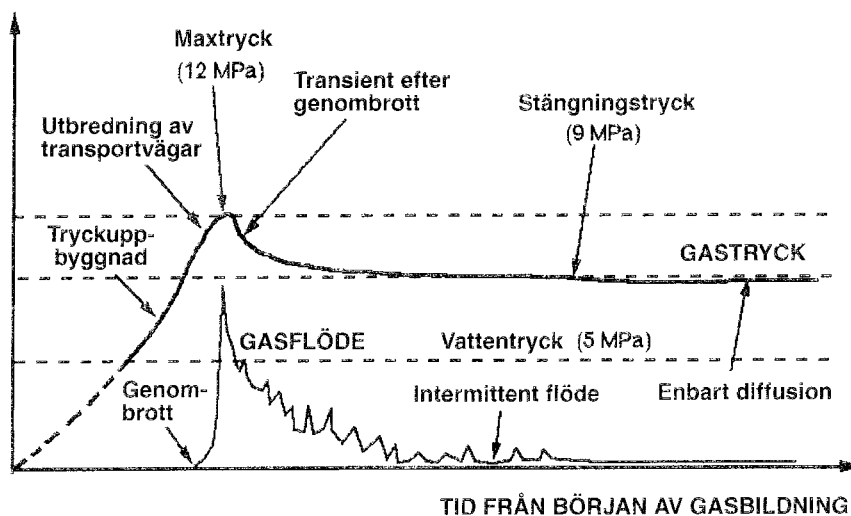
Processerna vid diffusiv transport genom bufferten har undersökts i samband med EU-projektet som rör mikrostrukturell modellering. Härvid har fundamentala frågor som yt- och pordiffusion delvis fått svar och de olika mekanismerna vid kat- och anjonmigrering till vissa delar klarlagts /6-13/. En svårighet som ännu ej övervunnits är att kemiska processer av typen komplexbildning under jontransporten inte kan modelleras.

För anjondiffusion är gängse matematiska uttryck för diffusiv transport tillämpliga eftersom man kan bortse från sorption. En viktig erfarenhet är att man måste på ett relevant sätt ta hänsyn till filterfunktionen vid användning av diffusionsceller i laboratoriet /6-5/. För utvärdering av diffusionskoefficienten för katjoner, såsom cesium och strontium, gäller också att filterfunktionen måste medräknas och det också nödvändigt att i separata "batchtester" bestämma kapacitetsfaktorn (retardationsfaktorn) som är en funktion av sorptionskoefficienten  $K_d$ , densiteten och porositeten hos bufferten.

### 6.4.3 Gasflöde

En fråga som behandlats särskilt ingående, såväl teoretiskt som experimentellt, är transport av gas, främst vätgas, genom bufferten. Ett flertal experiment har visat att bentoniten inte kommer att släppa igenom gas förrän trycket inuti kapseln överstiger summan av svälltrycket och det piezometrisk trycket /6-14, 6-15, 6-16, 6-17/. När trycket når detta värde bildas en transportväg genom bentoniten och gas frigörs. Trycket kommer att sjunka och, om gasproduktionen är tillräckligt låg, kommer transportvägen att stängas. Detta sker vid ett s k "shut-in" tryck, vilket är beroende av svälltrycket. Vid tryck lägre än "shut-in" trycket transporteras gas enbart med diffusion (se Figur 6-1). Om gasproduktionen däremot är tillräcklig för att bibehålla ett högre tryck så kommer gastransportvägen att hållas öppen.

"GAMBIT Club" är ett samarbetsprojekt mellan SKB, ANDRA, NAGRA, PNC och POSIVA. Avsikten med projektet är att utveckla en beräkningsmodell som skall kunna kvantifiera gastransport genom bentonit. Fas I av projektet startade 1996 och har just



Figur 6-1. Tidsförloppet vid gastransport genom bentonit.

avslutats. Under fas I har tonvikten lagts på att utveckla en förståelse för mekanismerna och de kontrollerande processerna för gastransport i högkompakterad bentonit och på att implementera och testa en preliminär beräkningsmodell. Modellen är baserad på den mest troliga tolkningen av tillgängliga experimentella data för gastransport i bentonit, dvs att gasinträning i leran sker genom inducerad mikrosprickbildning i leran och att de bildade transportvägarnas permeabilitet beror av effektivspänningen (eller ekvivalent, när randvillkoret konstant spänning används, av gstrycket). Sannolikhet för initiala transportvägar för gas i högkompakterad bentonit bedömdes som mycket liten. Detta gör det nödvändigt för gasen att bryta de interlamellära vattenfilmerna genom mikrosprickbildning och den nya modellen innehåller därför två steg: ett steg för propagering av gastransportvägarna och ett steg för kontinuerligt gasflöde. Det andra steget inträffar efter att gasen har brutit igenom på nedströmssidan. Teorin för elastisk sprickmekanik har använts till att utveckla en modell för sprickpropageringen genom leran som ingår i det första steget. I det andra steget etableras ett gasflöde genom leran. Utbredningen av transportvägarna är beroende av gstrycket och i modellen är den tryckberoende utbredningen så designad att den återskapar gasens beteende i experimenten.

## 6.5 Betong

Användningen av cementbaserade material inskränker sig till utförande av betongpluggar i deponeringstunnlarna och ingjutning av annat långlivat avfall än bränsle. Kontakten mellan cementmatrisen i pluggbetongen och återfyllningens bentonitkomponent kan leda till reaktioner mellan cement i betongen och smektit i återfyllningen. För SFR-silon, som omges av bentonit, utvecklades en enkel degraderingsmodell som innebar upplösning av cementens  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -komponent och diffusiv borttransport av reaktionsprodukterna /6-18/.

Motsvarande påverkan på smektitnehållet i återfyllningen är inte utredd. Fortsatt arbete i internationell samverkan pågår inom området med den preliminära slutsatsen efter bland annat 16 månaders hydrotermalförsök att viss omvandling av smektit till illit och klorit ägt rum som följd av kaliumfrigörelse från cementen, att någon kvartstillväxt skett och att kalciumsilikathydrat nybildats i smektiten /6-19/. Den resulterande, viktigaste förändringen är att återfyllningens redan från början svaga svällbarhet minskar som följd av illitisering och cementering. Fortsatt arbete är också inriktat mot att utreda hur cementinjektering av berget runt deponeringshålen och tillfälliga betongförstärkningar runt hålens överände påverkar bufferten.

## 6.6 Mål och program

Arbetet skall resultera i det underlag som behövs för säkerhetsanalyserna inför kommande tillståndsansökningar, för prediktion och planering av fältförsöken i Äspölaboratoriet, samt för den projektering av djupförvaret som börjar när data från platsundersökningar blir tillgängliga. Under den nämnda 3-årsperioden detaljeras kravspecifikationen för buffert och återfyllnaden.

### 6.6.1 Frågeställningar som utretts i huvudsak

Aktuella kunskaper och erfarenheter utgör underlag för successiv uppgradering av KBS-3-konceptet vad gäller geometri och sammansättning hos buffert och återfyllning.

Bland de frågeställningar som kan ses som utredda är temperaturförloppet och värmeinverkan på porvattentrycket i bufferten. Också frågan om betydelsefull erosion och borttransport av buffert som trängt in i sprickor i omgivande berg kan ses som tillräckligt utredd. När det gäller transportprocesser är bedömningen att vattenflöde genom bufferten är försumbart liten vid en halt av expanderande mineral av minst 50 % och en densitet i vattenmättat tillstånd av minst 1900 kg/m<sup>3</sup>, vilket ger möjlighet att välja buffertmaterial av mindre exklusivt slag än MX-80. Kapaciteten hos diffusiv jontransport är tillräckligt känd för att man skall kunna genomföra relevanta säkerhetsanalyser.

När det gäller val av buffertmaterial har en omfattande provning skett av olika slag av kommersiellt tillgängliga smektitiska lermaterial och sammanställning i databasform har gjorts. Ytterligare arbete av det slaget sker fortlöpande. För återfyllning av tunnlar och schakt har också ett betydande antal material undersökts och resultatredovisning finns också i databasform. För återfyllningen beror valet av sammansättning på funktionskriterierna och på hur anbringande och packning kan ske. Dessa frågor undersöks i pågående Äspöprojekt

### 6.6.2 Kvarstående frågeställningar

Den kemiska långtidsstabiliteten är den viktigaste frågan. Den tidigare använda illitiseringsmodellen ses fortfarande som användbart arbetsverktyg och ger vid tillämpning på KBS-3-konceptet resultatet att mindre än 10 % av smektitinnehållet omvandlas till illit i ett hundratusenårigt perspektiv. Den avgörande frågan är valet av parametervärden och försök har gjorts att härleda t ex aktiveringsenergin från naturliga analogier. Även om mekanismerna vid smektitomvandling är tillräckligt väl kända för att motivera användning av den modellen är det inte uteslutet att andra processer kan ha större betydelse och leda till snabbare förändring. Det är t ex möjligt att brammalit (natriumillit) kan bildas genom uttorkning och permanent kollaps hos montmorillonitstackar och att cementering kan ske genom utfällning av kisel som frigörs från gittret i den del av bufferten som har högsta temperaturen. Sådana processer kan vara orsaken till den förlust eller starka reduktion av svällningsförmågan hos smektit som påvisats vid experiment med ångbehandling vid hög temperatur ("Couture-effekten"), /6-20/. SKB:s aktuella bedömning är emellertid att cementering och permanent kontraktion av smektitpartiklarna kan vara ett mera betydande problem än illitisering. Naturliga bentoniter som undergått cementering genom utfällning av kisel och aluminiumföreningar på grund av värmepåverkan uppvisar t ex låga svällningstryck på grund av cementeringseffekter /6-21/. Fortsatt fokusering på sådana effekter sker därför under den kommande FUD-perioden. Verifierande försök genomförs i Äspölaboratoriet.

När det gäller förståelsen för gastransport genom bentonit så har stora framsteg gjorts den senaste perioden. En del frågeställningar återstår dock: det är fortfarande inte helt klart hur randvillkoren påverkar gastransporten och vi har inte heller någon färdig modell som kan extrapolera resultat från gastransportförsök till de förhållanden som gäller i ett förvar. Dessa frågor kommer att behandlas under den kommande perioden.

Det kan vara svårt att uppnå den blockdensitet som erfordras för att den mognade bufferten i deponeringshålen skall få tillräcklig densitet. Det kan åstadkommas genom att fylla spalten mellan block och hålvägg med pellets av högkompakterat lerpulver men inrinningen från berget måste då vara tillräckligt liten för att inte piping och erosion skall ske. Dessa frågor bearbetas med syfte att dels finna en generell lösning dels pröva möjliga förfaranden vid planerade fältförsök i Äspölaboratoriet.

Processen vid utsvällning av bufferten och efterföljande konsolidering under inverkan av den inre massan med hög densitet kan beskrivas konceptuellt men åtföljande mikrostrukturella förändringar, som kan leda till betydande anisotrop vattengenomsläpplighet, kan inte modelleras. Frågan, som kan ha avgörande betydelse för bevätningshastigheten hos bufferten i deponeringshålen, avses bli undersökt.

Momentana förskjutningar utmed flacka diskontinuiteter som skär genom deponeringshål och som är större än någon millimeter är inte sannolika men ackumulerade skjuvdeformationer av något eller några hundratals mm kan uppkomma i ett långt tidsperspektiv /6-1/. Det skulle kunna innebära exponering av bränsleelement och stälkapselkomponent för grundvatten och därmed accelererad lösning av bränslet samt gasbildning och utdrivning av kontaminerat vatten till ett närfältberg som blivit poröst genom tektoniken. Frågan, som sammanhänger med hur skjuvrörelser i jordskorpan är samhöriga med spänningstillstånd och strukturell uppbyggnad, fordrar fördjupat studium.

Återfyllningens främsta uppgift är att stödja det omgivande berget. Vilka krav man i övrigt bör ställa på återfyllningen, val av återfyllningsmaterial och teknik för återfyllning är föremål för undersökning.



## 7 Strukturgeologi och bergets mekaniska stabilitet

Ett KBS-3-liknande förvar förutsätter ett omgivande kristallint urberg. I detta avsnitt behandlas geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar liksom urbergets mekaniska egenskaper samt geodynamiska och mekaniska processer. Stabilitetsfrågor kan vara förknippade med naturliga rörelser eller inducerade rörelser beroende på förvarets utformning.

I FUD 95 gavs en relativt fyllig bakgrund och sammanställning av SKB:s verksamhet avseende geodynamiska och mekaniska processer till och med 1995 /7-1/. I det följande är redovisningens bakgrundsbeskrivning av dessa processer till viss del en förkortad version hämtad från FUD 95. Tonvikten är lagd vid vad som skett vid SKB under de senaste tre åren. I övrigt hänvisas till SKB:s Annual Reports /7-2, 7-3, 7-4/ och redovisningar i SKB:s TR-serie.

### 7.1 Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar

Berggrunden i Sverige kan indelas i tre stora enheter: Urberget, fjällkedjan (kaledoniderna) och den sedimentära berggrunden utanför fjällkedjan. Merparten av Sveriges urberg bildades genom veckningar, omvandlingar och magmainträngningar för mellan 2 500 och 500 miljoner år sedan. Det vi idag ser av den blottlagda urbergsytan låg vid bildandet på stora djup. Genom erosion har de över urberget liggande lagrens mäktighet minskat med 10–30 km.

Det svenska avfallsprogrammet har fokuserats på magmatiska och högmetomorfa bergarter som värdmaterial för en förvarsanläggning. Bergarterna är ofta förgnejsade med granitisk sammansättning.

Basiska bergartstyper, särskilt gabbro, har föreslagits som ett alternativ, då dessa kan erbjuda bättre sorptionsegenskaper och förutsättningar för självläkning av sprickor. Förekomsten av stora och homogena bergvolymerna med basiska bergartskroppar är dock starkt begränsad. Anläggningstekniskt är erfarenheterna från basiska bergarter ej väsentligt annorlunda än de från surare berggrund. När det gäller hydrauliska egenskaper visar tillgängliga resultat att basiska bergarter generellt sett är något mindre vattengenomsläppliga än graniter och gnejser. Spridningen inom en bergvolym är dock betydande. De relativt låga värmeledningsegenskaperna i basiska bergarter leder till att större förvarsvolymer måste tas i anspråk för att inte få för höga temperaturer i närområdet. En ytterligare negativ faktor är att gabbro ofta är intressant för utvinning av t ex nickel. Sammanfattningsvis är det uppenbara svårigheter med att hitta stora homogena bergvolymerna med basiska bergarter för ett djupförvar och vid en jämförelse, som tar hänsyn till hydrogeologi, geokemi, anläggningsteknik, visar det sig ej vara några uppenbara fördelar med gabbro i relation till granitiska bergarter /7-5/.

Det svenska urberget genomsätts av vissa storregionala mycket gamla deformationszoner. Den sydvästsvenska gnejsprovinsen begränsas i öster av en zon som sträcker sig från Skåne till Värmland, den så kallade Protoginizonen. Inom den sydvästsvenska gnejsprovinsen förekommer den så kallade Mylonitzonen från norska gränsen i Värmland söderut via Värm-

landsnäs till Varberg. Mylonitzonen är ett tecken på kraftiga deformationer i berggrunden för ca 1 miljard år sedan. Öster om zonen förekommer huvudsakligen gnejser med magmatiskt ursprung och väster därom är ytbergarter vanliga. Törnquistzonen är en mycket långsträckt zon inom den Euro-asiatiska plattan. Zonen utgör gräns mellan den Baltiska Skölden och ett vidsträckt nedsänkt område i västra delen av kontinentala Europa. I Skåne framgår Törnquistzonen med urbergshorstar och mellanliggande djupa sänkor med sedimentär berggrund.

Strukturgeologiska tolkningar har traditionellt sett enbart legat till grund för kvalitativa beskrivningar av berggrunden och dess tektoniska historia. Kärnavfallsbranschen med kvantifierande mekaniska och hydrogeologiska beräkningar i olika skalor och tidsperspektiv ställer extraordinära krav på att de karaktäriseringsmetoder som används är tydliga att följa genom hela lokaliserings- och platsundersökningsprogrammet. SKB:s erfarenheter när det gäller geologisk karaktärisering är att metoder för att kartera och beskriva bildningssätt är relativt välutvecklade. För karaktärisering av diskontinuiteter (lineament, zoner och sprickor) krävs emellertid en vidareutveckling av existerande tolkningsmetoder /7-6/.

Ovannämnda diskontinuiteter är exempel på spröd deformation. Stora delar av berggrunden har även deformerats plastiskt. Detta skedde tidigt i den geologiska historien då dagens erosionsyta låg på många kilometers djup och berggrunden uppträdde som en trögflytande massa. Den plastiska deformationen var särskilt omfattande i vissa uthålliga stråk, s k regionala skjuvzoner. Idag kan dessa utskiljas som förskiffrade eller förgnejsade partier av berggrunden. I förstudierna av bland annat Östhammars kommun har sådana skjuvzoner identifierats. Här omsluter de partier med relativt lite påverkad berggrund, s k tektoniska linser. Det finns idag ingen klar uppfattning av hur regionala skjuvzoner och tektoniska linser påverkar säkerheten i ett djupförvar. Möjligen kan högre vattengenomsläpplighet, ökad heterogenitet och ökad risk för framtida bergrörelser vara negativa faktorer. Av försiktighetsskäl har därför områden som berörs av plastiska skjuvzoner avfärdats i förstudierna.

## 7.2 Urbergets mekaniska egenskaper

Det kristallina svenska urberget karakteriseras av de ingående bergarterna samt av diskontinuiteterna, främst sprickor och sprickzoner. De intakta delarna av berget (bergblocken), diskontinuiteterna och i dessa eventuellt förekommande grundvatten utgör bergmassan. När bergmassan belastas deformerar den dels genom att de enskilda bergblocken deformerar, dels genom förskjutning, kompression eller vidgning av diskontinuiteterna. Förutom bergartens hållfasthets- och deformationsegenskaper måste därför diskontinuiteternas frekvens, orientering och mekaniska egenskaper beaktas /7-7/.

I regel påverkas bergets stabilitet av flera samverkande processer eller mekanismer. När spänningarna i berget ändras kommer diskontinuiteterna att påverkas varigenom deras egenskaper och egenskaperna hos bergmassan som helhet ändras. När det gäller berget spelar mekaniska processer genererade av temperatur en väsentlig roll. Vidare kan kopplingen mellan de mekaniska och hydrauliska förhållandena också vara betydelsefull. Den termo-mekaniska kopplingen är relativt väl utredd medan s k konstitutiva samband mellan mekaniska och hydrauliska egenskaper i sprickor är ett område under utveckling /7-8/.

Stabilitetsproblemen i berg gäller dels skjuvning längs befintliga sprickplan, dels tryck- eller dragbrott i det intakta berget. I svensk berggrund dominerar problemet med skjuvning.

Brott- och hållfasthetsegenskaperna bestäms av tryck-, drag- och skjuvhållfastheten. Draghållfastheten för kristallint berg är ca 10 procent av tryckhållfastheten. Normalt beskrivs ett bergmaterials hållfasthet med ett brottkriterium, t ex Mohr-Coulomb eller Hoek-Brown.

De hållfasthetstekniska teorierna för den intakta kristallina berggrunden är relativt väl utvecklade och prövade i laboratorieskala. Mekaniska karaktäristika för större diskontinuiteter som sprickzoner är däremot relativt okända. En sammanställning av befintlig information har genomförts /7-9/ baserad på observationer från begränsade delar av zoner eller från storskaliga laständringar främst inom gruvindustrin.

Bergmassans stabilitet bestäms huvudsakligen av det geometriska arrangemanget av befintliga diskontinuiteter och av deras mekaniska egenskaper. Vanligen beskrivs diskontinuiteternas mekaniska egenskaper med hjälp av idealiserade spännings-töjningssamband för normaldeformationer och skjuvdeformationer. Små skjuvdeformationer är huvudsakligen elastiska till sin natur, medan större skjuvdeformationer (glidning) innebär att skjuvhållfastheten har överskridits. Diskontinuiteterna påverkar stabiliteten och spänningsfördelningen, dels genom att inte kunna överföra dragspänningar, dels genom att vid låga normalspänningar inte fullt ut kunna överföra sprickparallella krafter. Vid en störning av bergmassans mekaniska jämvikt, på grund av lokala eller regionala spänningsförändringar, sker en del av de deformationer som erfordras för att på nytt erhålla jämvikt längs vissa orienterade och belastade diskontinuiteter. Bergmassans mekaniska jämvikt kan också störas av att den effektiva normalspänningen och därmed skjuvhållfastheten i sprickorna reduceras genom portrycksökningar.

### 7.3 Geodynamiska och mekaniska processer

Storleken på diskontinuiteter i berg spänner från hundratals kilometer till delar av millimeter. Diskontinuiteternas mönster uppträder allt ifrån millimeterskalan till kilometerskalan och är präglade av spröda skjuvbrott och/eller tensionsbrott. På grund av de tektoniska processer med varierande spänningssituationer som verkat på den Baltiska skölden genom hundratals miljoner år är det ej sannolikt att omfattande uppsprickning eller propagering kommer att ske inom de kommande 100 000 åren /7-10, 7-11, 7-12/. Det är däremot betydligt troligare att deformationer i berggrunden kommer att ske som reaktivering i redan befintliga sprickor och sprickzoner samt att hållfastheten kommer att bero på sprickornas egenskaper i bergmassan. Sprickor och sprickzoner kommer att "ta ut" förskjutningarna på grund av ändrade primärspänningar och inducerade laster. Stabiliteten i ett djupförvar påverkas såväl av geologiska processer som av inducerade rörelser på grund av förvarets utformning /7-7/.

SKB:s verksamhet behandlar följande discipliner och processer när det gäller övergripande geodynamik:

*Tektonik* är ett samlingsbegrepp för jordskorpan deformation och de strukturella former som då uppkommer. Begreppet omfattar deformations- och strukturformer från millimeter till kilometerskala. SKB sammanställer kunskapen om de olika tektoniska regimer som den Baltiska skölden varit utsatt för under de senaste 1 200 miljoner åren med fokus på olika förhärskande "lastfall" och de till dem hörande spänningsfälten.

*Glaciationer*; som med stor sannolikhet kommer att drabba den norra hemisfären i ett hundratusenårs perspektiv, väcker frågeställningar om mekanisk stabilitet, grundvatten-hydraulik och grundvattenkemi. SKB har låtit utveckla en numerisk glaciationsmodell över Skandinavien. Modellen är tidsberoende och inkluderar termo-mekanisk koppling. Glaciationsmodellen drivs av förändringar i lufttemperaturen och den beräknar ismassans tillstånd på en förutbestämd topografi. Med modellen är det möjligt att på ett översiktligt vis beskriva randvillkor för termo-hydro-mekaniska beräkningar (se även kapitel 16).

*Landhöjningen* efter den senaste nedisningen är en påtaglig geologisk process i Sverige, speciellt utmed Västerbottens kust där landet relativt Bottenhavet höjer sig med drygt 9 mm per år. Vid Weichselglacialens avsmältningsskede (för ca 18 000 år sedan) var världshavets yta ca 120 m lägre än idag och havsytan började stiga (eustatisk höjning). I och med det varmare klimatet tillfördes stora smältvattenflöden till oceanerna. När inlandsisarna successivt smälte minskade isens tryck på jordens krusta och en landhöjning började (isostatisk höjning). Sett i ett översiktligt perspektiv har landhöjningen varit och är en relativt kontinuerlig process i rummet och i tiden. Kunskapen om landhöjningsprocessen kan förväntas komma att fördjupas genom data från det nyinrättade GPS-nätet (GPS = Global Positioning System). I Sverige har nyligen ca 20 fasta mätstationer tagits i drift.

*Neotektoniska och postglaciala rörelser* har varit föremål för ingående studier. Med neotektoniska rörelser menas vanligen förskjutningar som ägt eller äger rum under nuvarande tektoniska regim, dvs under den tid då Atlanten funnits. Eventuella rörelser efter den senaste deglaciationen kallas för postglaciala. Det är väsentligt att utvärdera om nämnda rörelser kan leda till ny uppsprickning eller allvarligt förändra hydrogeologiska eller kemiska förutsättningar för ett djupförvar. Postglaciala förkastningar i den norra delen av Baltiska skölden har varit kända och föremål för undersökningar under ca 20 år. För närvarande anses de postglaciala förkastningarna huvudsakligen vara reaktiveringar av äldre dominerande zoner, men förekomst av nya sprickor i begränsad omfattning kan ej uteslutas. Orsakerna till de postglaciala rörelserna är sannolikt en kombination av relativt snabba förändringar av de vertikala lasterna (associerade med deglaciation) och horisontell kompression från mittatlantiska ryggen relaterad till kontinentaldriften. Jordskred och kraftigt störda jordlager (seismiter) är tydliga indikationer på kortvarig instabilitet.

*Seismicitet* kan sägas vara ett tecken på aktiv tektonik i ett geologiskt tidsperspektiv. Mer än 95 % av alla jordskalv sker vid kontinentalplattornas gränser. Årligen inträffar ca en miljon jordskalv på jordklotet med en magnitud över 2 på Richterskalan. Därav sker ett tiotal skalv i Sverige. Med andra ord är vårt land ett seismiskt lugnt område. De största jordskalven i Sverige under historisk tid når som högst en magnitud av ca 5. De svenska jordskalven är i huvudsak samlade till två områden. Det ena sträcker sig från Väneren ner till västkusten. Det andra området följer kusten längs Bottenhavet, Bottenviken mot Tornedalen och norra Lappland. Merparten av de svenska skalven sker djupt ner i berggrunden. Jordskalvets fokus ligger vanligtvis 10-20 km under markytan. Mekanismerna som styr skalven inom kontinentalplattorna, t ex inom den Baltiska skölden, är relativt dåligt kända. I Sverige gäller diskussionen om jordskalven styrs av de platttektoniska processerna, den pågående landhöjningen eller är en kombination av båda mekanismerna. Vad beträffar effekter av jordskalv på underjordsanläggningar gäller generellt att de mekaniska påkänningarna på sådana anläggningar blir mindre än för anläggningar som finns på markytan. Det finns en mängd observationer, framförallt från gruvor, som stöder dessa iakttagelser. Sammanfattningsvis ligger Sverige i ett seismiskt relativt opåverkat område. Idag finns inga tecken på att detta skulle ändras i ett 100 000-års perspektiv förutom de förändringar i spänningsförhållanden som kan orsakas av en framtida istid.

*Inducerade laster* är sådana laster som uppkommer till följd av den störning som djupförvaret i sig eller dess anläggande utgör. Skapandet av hålrum i bergmassan ger spänningsomlagring och spänningskoncentrationer. Den kortsiktiga spänningsbilden runt förvaret beror förutom på bergmassans egenskaper (initialspänningar, uppsprickning och hållfasthet) på uttagsmetod (försiktig eller konventionell borrhning och sprängning) samt på geometrisk utformning ("rektangulärt" eller "cirkulärt" tunneltvärsnitt). Bergschaktarbeten (borrning, sprängning) ger viss uppsprickning av berget nära tunnarna. Ett höghållfast och sprickfattigt berg främjar risken för skällberg. Värmeutvecklingen i det lagrade avfallet kommer att ge en förhöjd temperatur i djupförvarets närhet upp till lokalt ca 80°C, som sedan långsamt avklingar. Lokalt kring deponeringstunnarna ger den termiska lasten ökade tangentiella spänningar.

Förutsättningarna för att stabilitetsproblem skall uppstå är alltså störst i närområdet, där spänningsnivåerna och spänningsanisotropin kan vara betydande. Några huvudtyper av FoU-problem som är relaterade till rörelser i befintliga sprickor kan urskiljas:

- Bergblock lösgörs från hålrumsväggar på grund av förlorad eller för liten friktions-samverkan.
- Skjuvrörelser utlöses längs sprickor som skär deponeringshål.
- Stora spänningskoncentrationer med risk för brott i intakt berg uppstår intill hålrumsväggar som följd av skjuvrörelser längs tangentiellt orienterade diskontinuiteter.
- Kanaler utbildas, vidgas eller försluts, i deponeringshålens eller tunnarnas närmaste omgivning som följd av skjuvrörelser i system med ogynnsamt orienterade sprickorsningar.

## 7.4 Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 95

I FUD-program 95 beskrevs ett antal projekt om berggrundens stabilitet inför perioden 1996-2001. Här följer en kort lägesredovisning:

### *Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar*

- Kartläggning av tidigare sedimentlagars utbredning och mäktighet på det subkambriska peneplanet med hjälp av fissionsspårdatering. – Flera rapporter är nu sammanställda /7-13, 7-14/. Rapporterna ger ett underlag för att diskutera tidigare vertikala lastsituationer och deras konsekvenser på Baltiska skölden under Fanerozoikum i relation till förekommande islaster under Kvartär-perioden. Devonska sediment med 2–4 km mäktighet har under 100-tals miljoner år efter Kaledoniska bergkedjans bildning med stor sannolikhet täckt merparten av Baltiska skölden. Dessa sediment är nu borteroderade.
- Vidareutveckla metoder för identifiering av subhorisontella strukturer i berggrunden. – Fältverksamhet har genomförts regionalt i Äspös omgivning. Tolkningsmetoder av reflektionsseismiska undersökningar har förbättrats /7-15/.
- Vidareutveckla kvantitativa kriterier för klassificering av diskontinuiteter i berggrunden. – Kriterierna som skall tillämpas för att bedöma respektavstånd till förvarsdelar och kapselpositioner har delvis påbörjats inom ramen för SKB:s projekt om

lokaliseringsfaktorer /7-6/ men metodutvecklings- och tolkningsverksamheten kommer att fortsätta under nästa treårsperiod.

#### Urbergets mekaniska egenskaper

- Öka förståelsen av *bergspänningsmätningars representativitet* genom sammanställning av tillgängliga mätdata. – Ett samarbetsprojekt med stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, SveBeFo, har genomförts med exemplifierande data från Äspölaboratoriet /7-16, 7-17/. Resultaten säger bland annat att skillnader i vertikalspänning enbart delvis kan förklaras med djupberoendet. En jämförelse mellan överborrningsmetod och hydraulisk spräckningsmetod visar att spänningsmätningen är skalberoende med relativt sett större variabilitet för överborrningsdata.
- Genomföra och tolka *bergspänningsmätningar på djup* ned till 1500 m i borrhålet KLX 02, Laxemar, Oskarshamns kommun. – Genom modifiering av tillgänglig utrustning för hydraulisk spräckning har det varit möjligt att mäta bergspänningar ned till 1400 m. I kapitel 17 redovisas slutsatser från projektet ”Djupborrning KLX 02, Laxemar” /7-18/.
- Bestämma *normalstyvhet i fält för sprickor*. – Fältarbete har genomförts med den modifierade utrustningen för bergspänningsmätningar. Metoden testades i Laxemar djuphål med lyckat resultat /7-18/.
- Medverka till *bergmekanisk teoriutveckling* när det gäller *kryprörelser* av tunnelväggar och bedömningar av *effektivspänningar* i sprickigt berg. – Flera projekt har genomförts med teoriutvecklande inriktning /7-19, 7-20/. Effektivspänningsbegreppet introducerades av Terzaghi 1936 och har varit mycket användbart för att förstå geotekniska material, framförallt olika typer av jordar, som är mättade med vatten. När det gäller krypningsprocesser och förståelsen av dessa bedöms det som motiverat att fortsätta utvecklingsarbetet.

#### **Geodynamiska och mekaniska processer**

- Öka förståelsen om den kristallina berggrundens uppsprickning i tektoniskt, historiskt perspektiv, bland annat genom fältstudier som kartlägger maximala iakttagbara förskjutningsbelopp för diskontinuiteter (sprickor/sprick-zoner) i olika skalor. – Inom ramen för en studie om jordskalvs påverkan på ett djupförvar har redovisats befintliga databaser om relationer mellan jordskalvmagnituder, strukturers längd, vidd och förskjutningsbelopp. Det finns skäl att fortsätta arbetena med karterande fältstudier /7-21/.
- Utredda förutsättningarna för hydraulisk uppspräckning och/eller propagering av redan existerande sprickor/sprickzoner i samband med en glaciationscykel. – Den av SKB utvecklade glaciationsmodellen erbjuder möjligheter att bedöma dessa effekter. Vissa analytiskt inriktade arbeten är tills vidare initierade i samarbete med Inst. för Geoteknik vid Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. Under antagande av starkt förenklade randvillkor visar beräkningar att vid mycket höga vattentryck förutsättningar för ”jacking” skulle kunna vara möjliga till relativt stora djup (ca 200–300 m). Processen skulle kunna förklara de stratifierade finsediment som påträffats i bergsprickor. Verksamheten kommer att fortsätta.
- Studera aseismiska rörelser och pågående landhöjning bland annat med hjälp av de nyligen installerade permanenta stationerna i det svenska GPS-nätet. – Flera arbeten

med denna inriktning är publicerade. En rapport behandlar det svenska GPS-nätet /7-22/. Andra rapporter behandlar isostasi och eustasi /7-23, 7-24, 7-25/. Underlag finns nu för god prediktering av landhöjningen för kommande tiotusen år.

- Öka förståelsen om orsakerna till de jordskalv som förekommer i Baltiska skölden.  
– Ovanstående arbeten liksom sammanställningar om sprödetektonisk historia /7-10, 7-11, 7-12/ behandlar denna frågeställning som kräver fortsatta FoU-insatser. SKB har under de senaste åren engagerat sig i resultaten från det internationella Europrobe/Eurobridge-projektet för att få en bättre belysning av regionala skillnader inom Baltiska skölden när det gäller litosfärens utseende och egenskaper.
- Sammanställa erfarenheter av förekommande jordskalv vid forskningsgruvan Kamaishi, Japan och generalisera eventuella effekter på en underjordsanläggning.  
– Arbetet har fortsatt inom ramen för ett bilateralt avtal mellan SKB och PNC, Japan. SKB har sammanställt enkla lägesredovisningar. I samband med att PNC:s verksamhet nu avvecklas i Kamaishi förväntas en officiell redovisning av jordskalvsprojektet.
- Vidareutveckla dateringsmetoder av tidigare sprickzonsrörelser. – SKB har under den gångna treårsperioden ej genomfört någon verksamhet men avser att på nytt initiera projekt med denna inriktning som en uppföljning till de arbeten som tidigare publicerats /7-26/.
- Utreda den eventuella effekten av ett djupförvar på bergets hållfasthet i ett regionalt perspektiv. – Frågeställningen gäller om djupförvaret skall ses som ett horisontellt svaghetsplan i samverkan med eller fristående från regionala sprickzoner. Utredningen, som kräver viss bergmekanisk modellutveckling, har ej initierats.

## 7.5 Mål och program

Verksamheten skall kvantifiera och utreda konsekvenserna av långsiktig tektonisk påverkan, inklusive jordskalv och glaciationscykler. Prioriterade mål under perioden 1999–2004 är därvid att:

- sammanställa tillgänglig kunskap om vad de tektoniska och seismiska konsekvenserna kan bli för ett djupförvar i det svenska urberget,
- sammanställa en metod för kartläggning och tolkning av strukturgeologiska element, lineament, zoner och sprickor. Metoden skall användas vid karaktärisering av de geologiska förutsättningarna för byggande och drift av ett djupförvar.

I det nedanstående sammanfattas punktvis några prioriterade FoU-insatser för perioden 1999–2004 med inriktning på stukturgeologi och mekanisk stabilitet.

### 7.5.1 Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar

SKB skall *utarbета en enhetlig och definierad tolkningsmetodik för diskontinuiteter* i berggrunden samt vidareutveckla denna karaktärisering med avseende på hydraulik och mekanik för *klassificering av diskontinuiteter* i berggrunden. Detta ingår i underlaget för att bedöma respektavstånd till förvarsdelar och kapselpositioner. Arbetet skall ses som en fortsättning av de metoder som tillämpats vid SKB:s lokaliseringsprojekt, Äspölaboratoriet och i

Stripaprojektet. Det är väsentligt att olika typer av osäkerhetsfaktorer belyses vid karaktäriseringen och klassificeringen.

*Databas om förskjutningsbelopp för diskontinuiteter (sprickor/sprickzoner) i olika skalor:* Genom fältstudier som kartlägger maximala iakttagbara förskjutningsbelopp i förhållande till diskontinuiteters längd skall man kunna öka förståelsen om den kristallina berggrundens uppsprickning i tektoniskt, historiskt perspektiv.

Fortsatt *kartläggning av tidigare sedimentlagars utbredning* och mäktighet på det subkambriska peneplanet med hjälp av fissionsspårdatering. Studien skall ge ytterligare underlag för att diskutera vertikala lastsituationer och deras konsekvenser på Baltiska skölden under Fanerozoikum i relation till förekommande islaster under Kvarterperioden.

### 7.5.2 Urbergets mekaniska egenskaper

*Betydelse av regionala plastiska skjuvzoner:* Plastiska skjuvzoner har uppmärksammas på senare tid. SKB avser att studera deras betydelse för ett djupförvar. Exempelvis avses deras vattengenomsläpplighet att studeras. Detta genom att utnyttja SGU:s brunnsdatabas. Vidare kommer studier att initieras rörande frågan om upprepade bergrörelser är eller har varit vanligare i dessa zoner än annorstädes, s k reaktivering. Detta kan göras genom att studera zonernas korrelation till dagens jordskalv samt genom att utnyttja det s k subkambriska peneplanet som referensyta.

*Förståelse av sprickpropagering.* De konceptuella osäkerheterna när det gäller förståelse av sprickbildning i form av smällberg bedöms som relativt små. Det föreligger en omfattande erfarenhet från exempelvis gruvnäringen. Förståelsen för propagering från befintliga sprickor i en större bergvolym är däremot starkt begränsad. Processerna har främst studerats för enskilda sprickor i två dimensioner och inte för konnekterade spricksystem i tre dimensioner. SKB avser fortsätta de studier som initierats.

*Bergspänningars representativitet.* Analyser av diskontinuiteters reaktivering påverkas, liksom vid analysen av det intakta berget, av den primära bergspänningssituationen och bergets struktur. Bergspänningsmätningar utförs som underlag för designarbetet och strukturmodeller måste tas fram i olika skalor. De konceptuella osäkerheterna vad gäller spänningar och strukturer antas öka med ökande skala. Det finns skäl att fortsätta insatserna för att förstå bergspänningars representativitet.

Medverka till *bergmekanisk teoriutveckling* när det gäller *kryprörelser* av tunnelväggar och deponeringshål. De konceptuella osäkerheterna, när det gäller krypprocesser i uppsprucket berg, är stora relativt andra mekaniska förlopp. För tidsberoende deformation under treaxiellt spänningstillstånd finns inga generella uttryck. Dataosäkerheten bedöms vara stor för såväl de empiriskt grundade som de förenklade reologiska modellerna vid tillämpning i kapselhålsskala och förvarsskala. Hittills har man inte kunnat beakta volymberoende och att blockrörelser bestäms av hur diskontinuiteter deformeras med tiden samt hur rörelser som innebär avlossning av block påverkar spänningssituationen i kvarvarande berg.

### 7.5.3 Geodynamiska och mekaniska processer

*Sammanställningsprojekt om storskalig mekanisk stabilitet.* SKB har under ca tjugo år i en rad projekt studerat exogena och endogena processer i den Baltiska skölden. Under de närmaste tre åren planeras ett sammanhållet projekt som skall behandla sprödtekonisk



utveckling med hänsyn till orogener, kontinentalförskjutning, seismicitet, glaciationer, landhöjning etc. Sammanställningen skall ses som ett viktigt underlag inför platsundersökningarna och ge randvillkoren till de mekaniska bedömningarna i de platsspecifika säkerhetsanalyserna.

*Effektivspänningspåverkan i samband med en glaciationscykel.* För fördelningen av vattentryck i samband med en glaciationscykel är bilden fortfarande hypotetisk och forskningsverksamhet pågår för att bland annat klarlägga jökellävlarnas och permafrostens influens. Med beaktande av vattentrycksförändringar under en glaciationscykel kan förutsättningar för "jacking" och skjuvning närmare bedömas.

*Öka förståelsen om orsakerna till jordskalv* som förekommer i Baltiska skölden. Det finns nu ett flertal studier som belyser effekter av jordskalv på ett djupförvar, men kunskapen är begränsad om orsakerna till dagens, om än mycket låga, seismiska aktivitet i Baltiska skölden. Storregionala studier av litosfären kan belysa frågeställningen i ett nytt perspektiv.

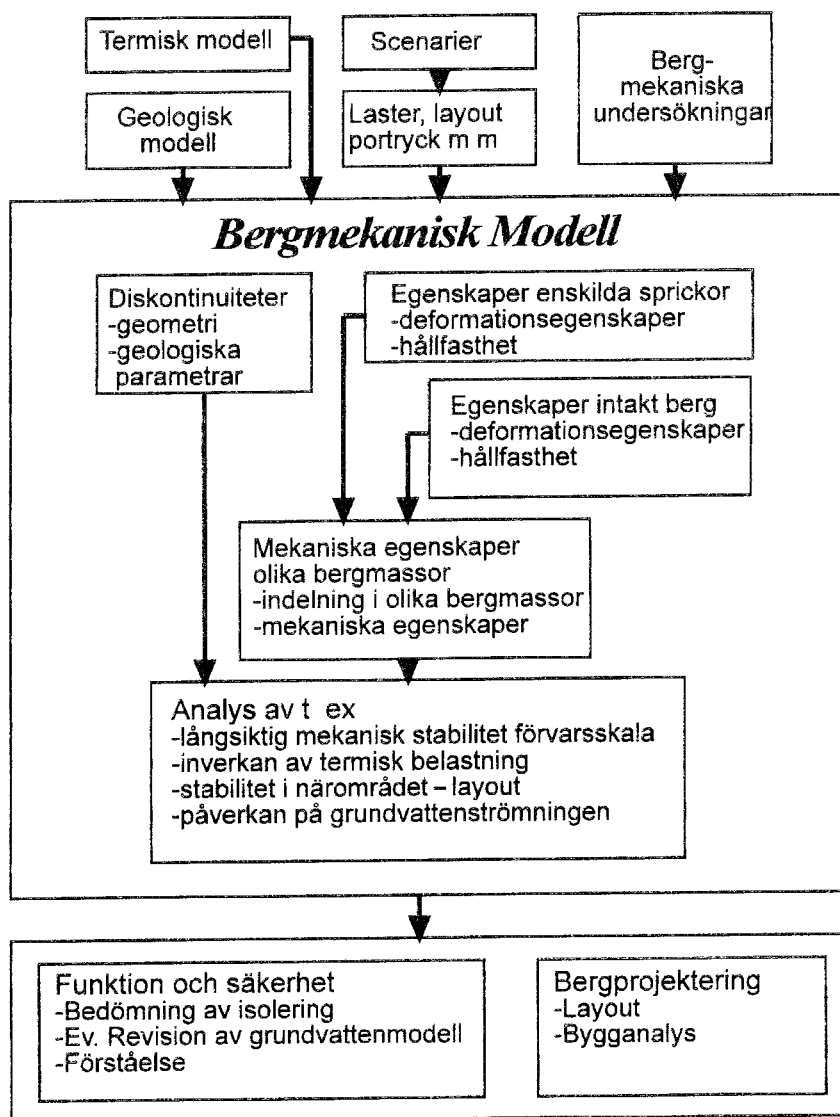
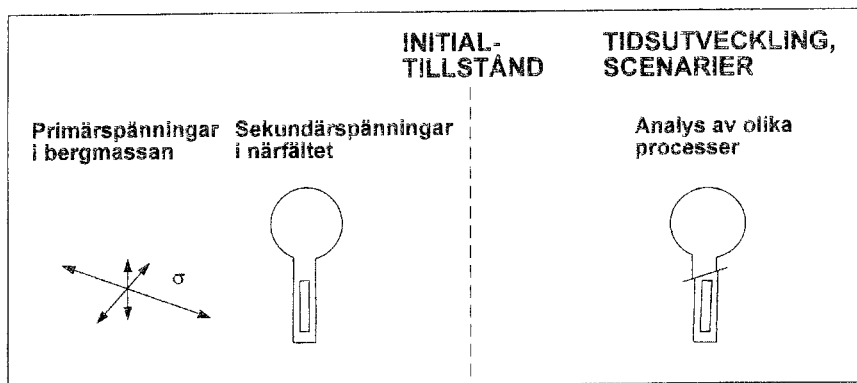
*Utreda orsak till och djupgående av urbergsgrottor.* På många platser i landet finns stora blockansamlingar, s k urbergsgrottor vars bildningssätt ej har klarlagts. En förklaring är att de är resultaten från en seismisk händelse /7-27/. Det finns även andra förklaringar. SKB har påbörjat ett arbete för att klarlägga hur blockansamlingarna har bildats samt för att kartlägga djupgåendet för en av dessa formationer, de s k Bodagrottorna vid Iggesund.

## 7.6 Bergmekaniska modeller

För djupförvaret berörs ett antal mekaniska frågeställningar under såväl förstudier som under platsundersökningar och detaljundersökningar. De anläggningstekniska aspekterna är i hög grad integrerade med mekaniska frågor som i sin tur berör förvarets funktion och långsiktiga radiologiska säkerhet. I säkerhetsanalysen, som bedömer de långsiktiga radiologiska konsekvenserna, beaktar man olika scenarier samt utgår från ett initialt tillstånd när kapslarna deponerats och deponeringstunnlarna återfyllts.

Utvärdering av stabilitet i närområdet och lämplig utformning av deponeringsorter och deponeringshål avser funktion både på kort och lång sikt. Speciell uppmärksamhet måste ägnas den direkt spräng- eller borrhningsstödda zonen. Ett flertal analyser har gjorts för att bestämma hur stora deformationer av deponeringshål som krävs för att ge skador på kapseln, men fortsatt modellarbete pågår. Dessa resultat kan tillsammans med de mekaniska analyserna t ex användas för att ta fram kriterier för acceptans av deponerings-tunnlar och orter, samt ge ledning till lämplig orientering och utformning av desamma (t ex bedömning av förstärkningsbehov och risk för smällbergsproblem, bedömning av utbildandet av en störd zon). Utvärderingen bör helst baseras på kvantitativa beräkningar. De modelleringsverktyg som används motsvarar de som kan användas i större skala, men för att modelleringen skall bli meningsfull behöver diskontinuiteter beskrivas med en högre detaljeringsgrad.

Analysen i förvarsskala behöver inte nödvändigtvis göras med kvantitativa modeller. Identifikation av storskaliga deformationszoner och bestämning av allmänt spänningsläge kan vara tillräckligt. Resonemangen kan i så fall bygga på mer kvalitativa och/eller generiska analyser av storskalig inverkan av värme, islaster m m. Den storskaliga analysen behöver dock kunna ge randvillkor till en bergmekanisk analys i närområdesskala. Kvantitativ analys behöver dock ske för att försäkra sig om att den termiska utvidgningen inte orsakar problem, som till exempel dragspänningar som går ner på för stora djup. Den



*Figur 7-1. Övre: Analys av förvarets långsiktiga säkerhet förutsätter relevanta beskrivningar av initialtillståndet och av tidsutvecklingen. Undre: De bergmekaniska frågeställningarna med analyser i sitt sammanhang av krav på indata och syfte /7-28/.*

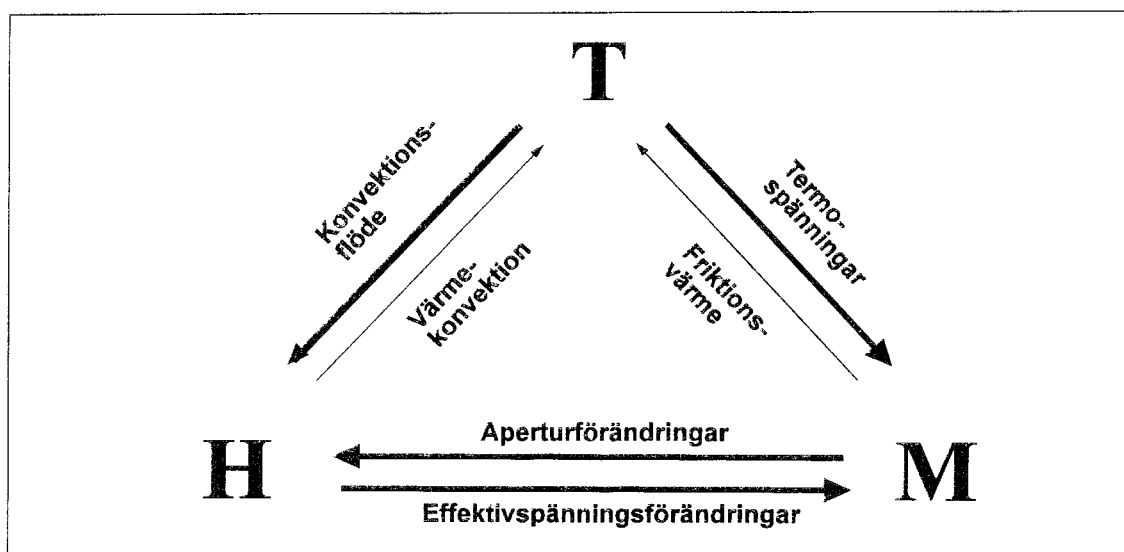
kvantitativa analysen kan göras med beräkningsprogram där spänningar och deformationer beräknas för givna yttre laster. I en del modeller beskrivs berget som sammansatt av diskreta block avgränsade av diskontinuiteter. Olika deformations- och hållfasthetsmodeller kan då tillordnas diskontinuiteterna respektive bergmassan i blocken. Det finns även andra modelleringstekniker explicit för sprickor. Berget kan också i sin helhet beskrivas som ett kontinuum där materialmodeller och materialparametrar väljs med hänsyn till diskontinuiteternas frekvens, orientering och mekaniska egenskaper.

En bergmekanisk modell med dess innehåll och olika syften kan schematiskt skildras enligt Figur 7-1. För analys av frågor om mekanisk stabilitet i geosfären som har bäring på förvarets funktion och långsiktiga säkerhet i en säkerhetsanalys ingår följande processer:

- Sprickbildning. Nya sprickor i intakt berg och propagering av befintliga sprickor.
- Reaktivering. Rörelser i existerande diskontinuiteter.
- Krypdeformationer. Kontinuerliga tidsberoende deformationer.
- Termiskt orsakade deformationer. Alla deformationer av ovanstående typ som speciellt har att göra med förvarets temperaturutveckling.

Processerna kan i ett långsiktigt perspektiv äga rum i stor eller liten omfattning. För att kunna göra säkerhetsmässiga bedömningar måste man förstå och kunna beskriva initialtillståndet, och dessutom för olika scenarier kunna uppskatta omfattningen och konsekvenserna av de olika processerna (Figur 7-1, övre delen). För detta upprättas och analyseras bergmekaniska modeller (Figur 7-2, undre delen) /7-29/.

I regel påverkas bergets stabilitet av flera samverkande processer eller mekanismer. När spänningarna i berget ändras kommer diskontinuiteterna att påverkas varigenom deras egenskaper och egenskaperna hos bergmassan som helhet ändras. När det gäller berget spelar mekaniska processer genererade av temperatur en väsentlig roll. Vidare kan kopplingen mellan de mekaniska och hydrauliska förhållandena också vara betydelsefull (se Figur 7-2) /7-30, 7-31, 7-32/. Några viktiga kopplade processer är:



Figur 7-2. Termo-Hydro-Mekaniskt kopplade processer i schematisk form. Efter Stephansson et al., 1996 /7-33/.

- Ändring av effektivspänningar (normalspänningar) och därmed ändrad skjuvhållfasthet hos diskontinuiteter till följd av temperaturändring (T-M) eller på grund av förändring i vattentryck (H-M).
- Ändring av apertur eller innehåll av sprickmineral och därmed ändrade genomsläpplighetsegenskaper i diskontinuiteter på grund av momentan eller tidsberoende skjuvdeformation (M-H).
- När deponeringshål borraras kan diskontinuiteter deformeras eller propagera till följd av vridning eller annan förändring av det lokala spänningsfältet. Detta kan leda till ändrad hydraulisk konduktivitet i närfältet (M-H).

I det sk DECOVALEX-projektet (international co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) har kopplade termo-hydro-mekaniska modeller utvecklats och verifierats. Från projektets första etapp är slutsatserna bl a att temperaturfältet runt ett förvar låter sig väl beskrivas som rena värmeledningsproblem utan hänsyn till hydro-mekanisk koppling. Spännings- och förskjutningsförhållanden är ofta konsistenta för olika modelleringskoncept medan de hydrauliska resultaten visat påtagliga olikheter. Resultatens allmängiltighet är också mycket känsliga för val av randvillkor med hänsyn till om beräkningsfallen är två- eller tredimensionella /7-31/.

## 8 Vattenflöde i berg

Bergets förmåga att begränsa transport av olika ämnen är en sammansatt egenskap. Den har bland annat att göra med grundvattenflöden och flödesvägar. Dessa bestäms i sin tur av bergets vattengenomsläpplighet, graden av inhomogenitet, det aktuella områdets topografi, vattenbalans, etc. Om vattentransporten sker utan påverkan av kvarhållande mekanismer betraktas den som icke-reaktiv. Den icke-reaktiva transportprocessen innehåller advektion (konvektion), kinematisk dispersion och molekylär diffusion. Den sammantagna retarderande effekten på nuklidtransport styrs av diffusionen in i intakt berg och av berggrundens sorptionsegenskaper. Dessa bestäms av grundvattenkemin, bergets mineralogiska sammansättning, bergets mikrosprickor, sprickmönstrets karaktär och tillgången till sorptionsytor.

Vad som beskrivs nedan är till betydande del en sammanfattning av de resultat som har presenterats i SKB:s Annual Reports under de senaste åren, samt i övriga enskilda SKB rapporter. Dock diskuteras även ytterligare insatser som kan krävas för en fullgod kunskap om vissa processer och relaterade problem. Många av de frågeställningar som tas upp här berörs även under, och är överlappande med, vissa projekt inom Äspö HRL.

### 8.1 Grundvattenflöde och advektion

I det förra programmet identifierades behov av att skapa en databas för kinematisk porositet och dispersion i sprickigt berg, att utreda hur absolut tryck och hydrauliska gradienter i berg kan kopplas till grundvattnets in- och utströmningsområden, att bearbeta brunn-data för att utreda om denna typ av data är användbar och kan användas för att se skillnader mellan olika områden, samt slutligen att utreda blandningsprocesser mellan salt och sött grundvatten med hänsyn till landhöjning.

Beträffande kinematisk porositet och dispersion är detta två parametrar som är av stor vikt att känna till vid prediktion av transporten av icke-reaktiva ämnen i berggrunden; för sorberande ämnen tillkommer ett antal andra parametrar som kan ha större betydelse för det slutliga transportförloppet. Arbete inom detta område har bedrivits inom Äspö HRL i det så kallade Fracture Classification and Characterization projektet och inom Tracer Retention Understanding Experiments (se kapitel 14). Båda dessa projekt ger relevant information om bergets egenskaper för uppskattning av sprickporositet. Vidare kan nämnas att en litteratursammanställning har gjorts över spårämnesförsök som utförts på ett flertal olika platser /8-1/; även denna studie ger indikationer på relevanta transport-egenskaper.

Ett projekt har drivits för att studera storskaliga grundvattenrörelser resulterande från topografiskt styrda gradienter. Ett syfte har varit att utröna in- och utströmningsområden för ett förvar beläget på ca 500 m djup. I ett första skede härleddes en analytisk lösning till problemet. Analysen visar att transporttiden från förvar till biosfär kan uttryckas som funktion av bland annat gradient och kvot mellan längdskalor för topografi och hydraulisk gradient /8-2/. I ett andra skede tillämpades metodologin på tre olika platser i ett regionalt perspektiv /8-3/. Resultaten gav mycket långa transporttider jämfört med tidigare numerisk modellering; en förklaring kan vara att det regionala flödet inte manifesteras på förvarsdjup av ca 500 m där istället lokala förhållanden styr.

I ett relaterat projekt har det undersökts om Sveriges Geologiska Undersöknings (SGU) brunnarkiv kan användas för att på en regional skala karakterisera den kristallina berggrundens hydrauliska egenskaper /8-4/. Detta gjordes genom att jämföra SGU data mot borrhålsdata från två platser där SKB tidigare genomfört analyser. Resultatet gav vid hand att data från brunnarkivet är användbara även om djupberoendet är svårt att utvärdera på grund av den preferens som finns för att borra till större djup i lågpermeabelt berg.

Forskning kring blandningsprocesser mellan salt och sött grundvatten med hänsyn till landhöjning och Östersjöns utvecklingsstadier har bedrivits under innevarande programperiod. Resultaten beskrivs i kapitel 16 som del av det Paleohydrogeologiska programmet.

## **8.2 Karakterisering av sprickor med hänsyn till flöde, advektion och retention**

Ett tidigare projekt med syfte att genom bildbearbetningsanalys studera sprickaperturer och morfologi har avslutats /8-5/. Som ett komplement till denna studie analyserades även flödet genom sprickorna i en biaxialcell. De experimentella resultaten användes för att verifiera numeriska och analytiska flödes- och transportmodeller /8-6/. De analytiska och numeriska resultaten överskattade aperturen med ungefär en faktor två jämfört med den mätta aperturen.

Ett fortsättningsprojekt har även initierats som syftar till att utveckla denna typ av bildanalysteknik för bilder som producerats med hjälp av en TV-logger (BIPS). Att kunna mäta och karakterisera sprickors hydrauliska och retarderande egenskaper på detta sätt in situ skulle vara värdefullt bland annat vid platskarakterisering. Mer om detta projekt diskuteras under Program nedan.

Slutligen kan även nämnas att bildanalysmetodologin såsom utvecklad i /8-5/ även kommit till användning inom TRUE (avsnitt 14.4.4).

## **8.3 Mål och program**

Insatserna syftar till att öka den generiska förståelsen av både grundvattenflöde och transportprocesser såsom advektion och retentionsmekanismer. Denna generiska kunskap har tillämpning både inom säkerhetsanalysmodeller (kapitel 3) och för platskarakterisering och platsvalsprocessen. Arbetet bedrivs med starka kopplingar till motsvarande relevant verksamhet vid Äspö HRL och kan delvis ses som en integrerande funktion mellan denna forskning och säkerhetsanalysens behov. De viktigaste specifika målen för kommande period är:

- att adressera uppskalningsfrågor, samt
- att undersöka vilka faktorer som styr lokala strömningsmönster.

Målen diskuteras i detalj nedan.

En viktig fråga att adressera under kommande period är (upp)skalning av parametrar vid modellering av grundvattenflöde och transport. Detta gäller i första hand en parameter såsom hydraulisk konduktivitet, men kan även gälla mer transportinriktade parametrar.

I utförda och pågående studier inom SKB har uppskalningsproblematiken för hydraulisk konduktivitet identifierats, t ex /8-7/. Frågan är hur mätningar utförda på en viss skala kan skalas upp till den diskretiseringsskala som används i en numerisk modell. Denna fråga är speciellt relevant för kontinuummodellering. Relaterade frågor är bland annat vilken skala som egentligen undersöks vid test i fält (supportskala), samt hur randvillkor förs över från modeller med större domän och diskretisering till mindre men mer detaljerade modeller. Uppskalning av konduktivitet och överföring av randvillkor diskuteras även under Säkerhetsanalysmodeller (kapitel 3).

SKB planerar att utföra både test i fält vid Äspö HRL samt genomföra generiska modellstudier för att adressera skalningsfrågor. En specifik fråga att undersöka är om skalproblematiken för kontinuummodeller delvis kan undanröjas genom ett kopplat utnyttjande av diskreta spricknätverks- och kontinuummodeller.

En fråga av fortsatt stor vikt för framtiden är grundvattenflödets in- och utströmningsområden. I den genomförda studien /8-3/ visades att den regionala strömningen inte verkar påverka strömningsförhållandena för ett planerat förvar i nämnvärd grad; de lokala förhållandena verkar istället styra. Frågan att utreda är sålunda vilka dessa lokala faktorer/egenskaper är som har en styrande påverkan på strömningsmönstret. Bland denna typ av faktorer kan nämnas inverkan av vattendrag, sjöar och lokal topografi. En korrekt förståelse av dessa yt nära hydrologiska processer erfordras även för att bättre beskriva kopplingen mellan geosfär och biosfär.

En sammanställning och kunskapsuppbyggnad vad gäller tvåfasflöde och gastransport kommer att genomföras. Inom säkerhetsanalysen kommer dessa frågeställningar in i flera av geosfärens olika delanalyser. En grundläggande genomgång av vilka delområden som bör prioriteras för framtida forskning krävs innan vidare insatser initieras.

Projektet angående sprickanalys med hjälp av TV-logger (BIPS) i borrhål kommer att fortsätta. BIPS-tekniken tros kunna ge information om de mer konduktiva sprickornas främst hydrauliska men kanske även retarderande egenskaper.

## 9 Grundvattenkemi

I detta avsnitt behandlas grundvattenkemins betydelse för djupförvaret och dess koppling till bergets mineral och hydrauliska egenskaper. Ett övergripande mål är att försäkra oss om att den kemiska miljön i förvaret är gynnsam. För det ändamålet gör vi följande:

- Klarlägger kemiska förhållanden och processer som påverkar förvarets barriärfunktion initialt (under driften) och i framtiden (efter förslutningen).
- Belägger och detaljerar de geohydrologiska grundvattenflödesmodellerna, speciellt med avseende på tidigare rådande och framtida förhållanden.

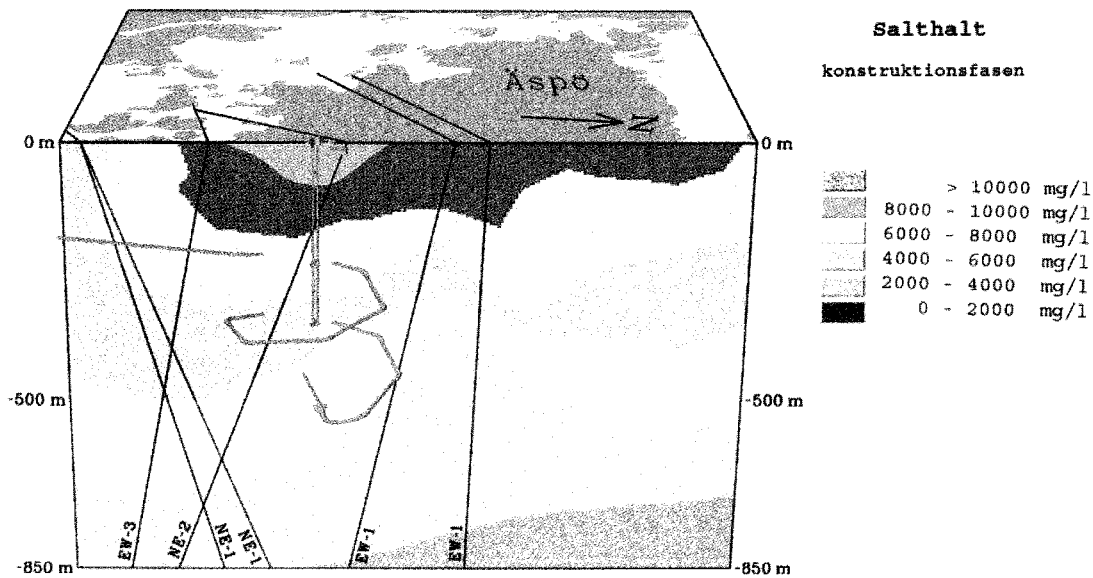
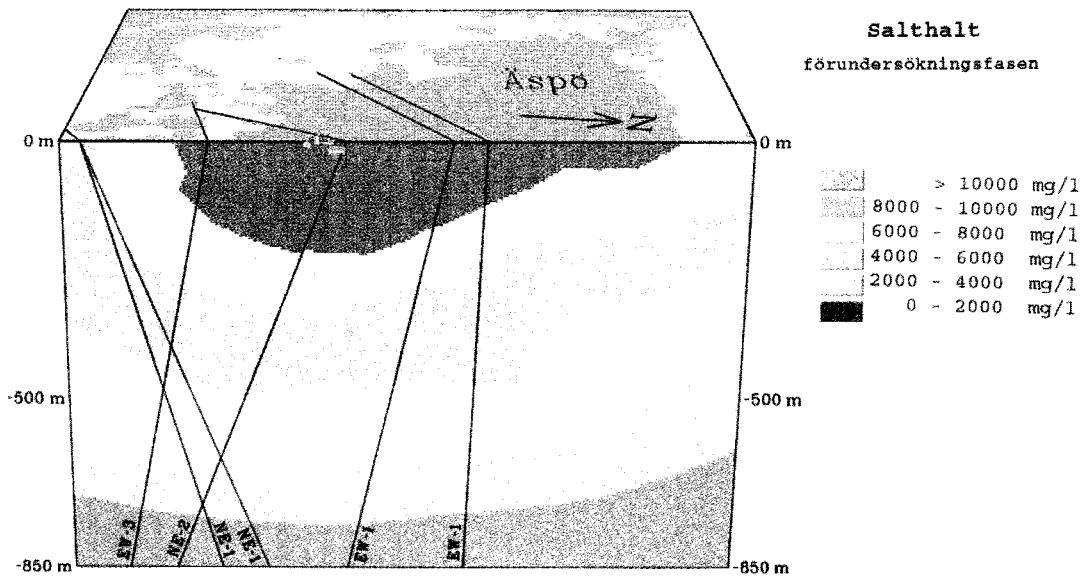
### 9.1 Grundvattnets kemiska sammansättning i Sverige

SKB har undersökt de grundvattenkemiska förhållandena på stora djup i berggrunden på olika håll inom landet. Grundvattenprovtagning och analys har utförts i samband med typområdesundersökningarna i början av 80-talet, i Stripa, i Finnsjön och på Åspö. En sammanställning av alla dessa resultat finns i Tabell 9-1 och 9-2 uppdelade på platser med sött respektive platser med salt grundvatten.

**Tabell 9-1. Haltintervallet för 95 % och 99 % av alla observationer av de viktigaste kemiska faktorerna för bränslets, kapselns, lerans och bergets barriärfunktion på platser med sött grundvatten. Totalt finns 491 observationer från platser med sött grundvatten. Dessa härrör från i medeltal fem djupa borrhålssektioner i 2-5 borrhål i typområdena Taavinunnanen, Kamlunga, Gideå, Svartboberget, Fjällveden och Klipperås. Halter angivna i mg/l.**

Komponent	95 % av alla observationer	Median värde	99 % av alla observationer
pH	6,2 – 9,2	8,1	6,1 – 9,3
Cl	0,6 – 440	5,8	0,5 – 470
SO <sub>4</sub>	0,1 – 230	3,0	0,1 – 480
HCO <sub>3</sub>	9 – 270	120	7 – 300
Ca	3 – 110	16	2 – 190
K	0,5 – 5	1,8	0,1 – 6,2
Fe(löst)	0,007 – 20	0,88	0,004 – 28
HS	0,01 – 1,1	0,01	0,01 – 1,2
TOC	1,2 – 40	4,4	0,5 – 6,7





*Figur 9-1. Salthaltsfördelningen i berggrunden kring Äspö baserad på observationer i borrhål före och efter tunnelkonstruktionsfasen. Metoden Kriging har använts för att interpolera mellan observationspunkterna.*

Tabell 9-2. Haltintervallet för 95 % och 99 % av alla observationer av de viktigaste kemiska faktorerna för bränslets, kapselns, lerans och bergets barriärfunktion på *platser med salt grundvatten*. I tabellen finns totalt 395 observationer från Simpevarpsområdet, företrädesvis Äspö, men även Laxemar och Ävrö ingår. Kloridhalter över 12 000 mg/l härrör från det 1700 m djupa hålet KLX 02 på Laxemar. Halter angivna i mg/l.

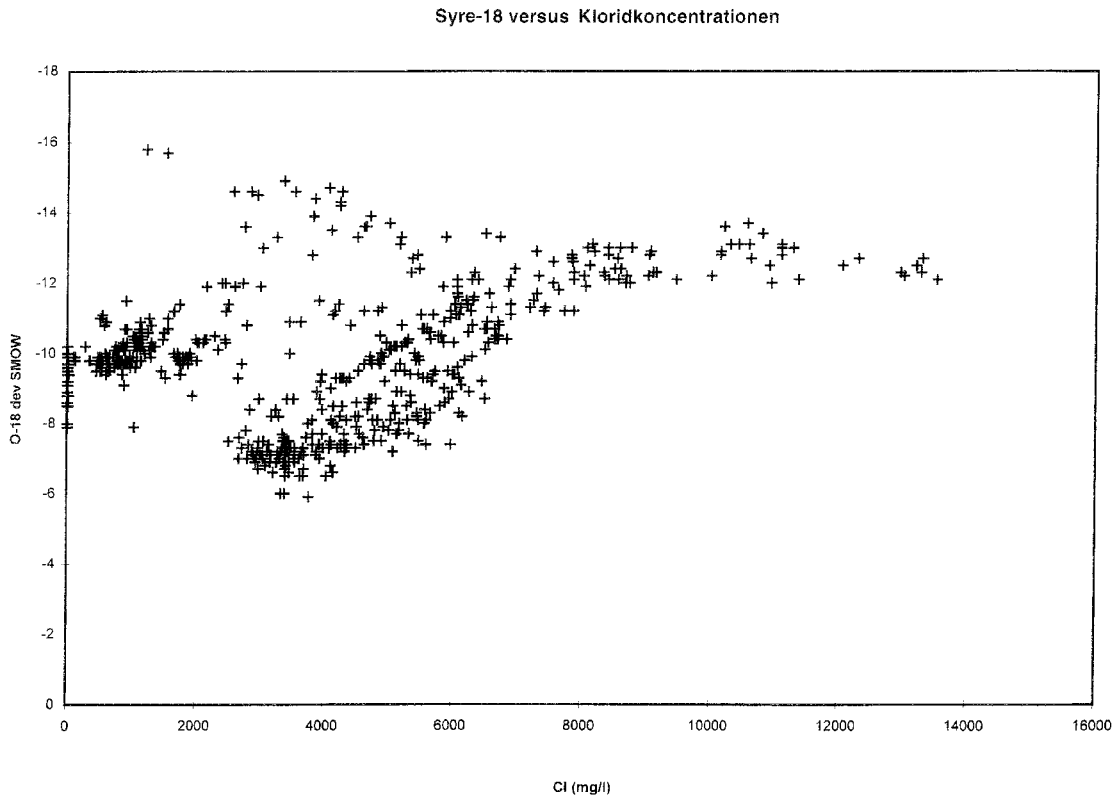
Komponent	95 % av alla observationer	Median värde	99 % av alla observationer
pH	6,3 – 8,4	7,9	6,0 – 8,5
Cl	9,6 – 30000	4200	5,7 – 47000
SO <sub>4</sub>	21 – 930	280	17 – 1100
HCO <sub>3</sub>	7 – 320	61	6 – 450
Ca	15 – 13000	1100	10 – 20000
K	1,3 – 30	6,8	1 – 33
Fe(löst)	0,02 – 3,2	0,34	0,003 – 4,4
HS	0,01 – 2,6	0,41	0,01 – 5,0
TOC	0,5 – 24	5,9	0,1 – 29

## 9.2 Grundvattentyper och deras ursprung på Äspö

De undersökningar och utvärderingar som pågått intermittent under hela Äspöprojektet sedan starten 1987 har detaljerat kunskapen om olika grundvattentyper och deras ursprung. Den stora mängden data med hög kvalitet har gjort det möjligt att skapa en nyanserad bild av grundvattnets ursprung och utveckling /9-1, 9-2/. Två möten i serien Äspö International Geochemistry Workshops /9-1, 9-3/ har mycket påtagligt bidragit till att kunskapen uppnått den nuvarande nivån. Även om modellerna endast beskriver förhållandena kring Äspö, så är kunskapen om vattentypernas ursprung och utveckling direkt användbar vid varje annan tänkbar platsutvärdering.

I berggrunden kring Äspö förekommer både sött och salt vatten. Sötvattnet ligger i de översta 100 metrarna under markytan varefter salthalten successivt ökar mot djupet, se Figur 9-1. Den nästan linjära salthaltsökningen mot djupet kunde tolkas som att ett sött vatten på ytan så småningom ersattes av ett salt vatten mot djupet. Så enkelt är det dock inte. Om man betraktar syre-18 data som funktion av kloridhalten, ser man att de följer olika trender, trots att båda ämnena är vattentrogna och inte påverkas av reaktioner mellan grundvatten och mineral, se Figur 9-2. Detta visar att vatten med olika ursprung har blandats och förekommer i olika proportioner på olika ställen i berget. Salta vatten kan härstamma från dagens Östersjövatten, gammalt relict Östersjövatten från Littorinastadiet för ca 7000 år sedan och salt vatten som har sitt ursprung i berget /9-1, 9-2, 9-4/. Sött vatten kan också ha varierande ursprung. En andel härrör från avsmältningen av den senaste inlandsisen för ca 13 000 år sedan, medan en annan andel härstammar från regnvatten som infiltrerat efter att Äspö steg upp över havsytan för ca 3000 år sedan.

Man kan fortsätta att inkludera fler och fler av de kemiska konstituenterna i denna analys och därmed öka informationsinnehållet. Om man t ex inkluderar tritiumhalten får man en högre upplösning och större möjlighet att spåra samband och ursprung. Tritium visar entydigt om det finns vatten som infiltrerats under modern tid och att sådant vatten



*Figur 9-2. Syre-18 som funktion av kloridhalt.*

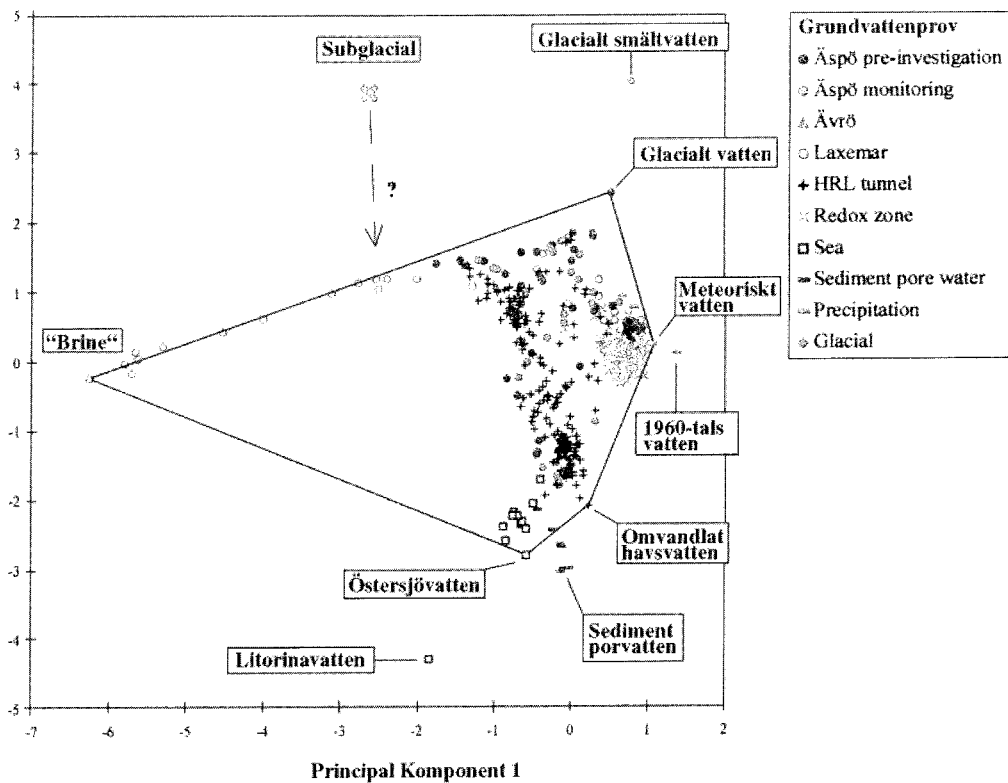
transporterats till den plats där det påträffats under de senaste 40 åren. Detta vatten ligger ytligast i berget.

Det blir emellertid snabbt omöjligt att genom visuell betraktelse hålla rätt på de olika parametrarnas uppträdande sinsemellan. Därför används en statistisk multivariatmetod för att korrelera variablerna mot varandra. Med en  $s_k$  principalkomponentanalys kan man komprimera informationen från samtliga parametrar till ett fåtal principalkomponenter. Med hjälp av första och andra principalkomponenten kan 72 % av variabiliteten i de tio viktigaste kemiparametrarna beskrivas /9-1/. Vidare kan man genom att avsätta de två principalkomponenterna mot varandra identifiera extrempunkter som ligger ytterst och utgör ändpunkter i grundvattensystemet.

I nästa steg har de viktigaste ändpunkterna identifierats med avseende på vattnets ursprung, och de övriga punkterna kan beräknats som en blandning av vatten från de identifierade ändpunkterna (se avsnitt om modellutveckling). Kemin hos grundvatten från Äspö och det djupa borrhålet KLX02 på Laxemar, som ligger ca 3 km väster om Äspö, kan således beskrivas som en blandning av 5 referensvatten vilka alla återfinns i berggrunden och vars ursprung man kan härleda /9-1, 9-2, 9-4/. Dessa kallas, glacialvatten, (meteoriskt) sötvatten, sedimentvatten, Östersjövatten och saltvatten (brine), se Figur 9-3. Av dessa referensvatten är Östersjövatten och meteoriskt väldefinierade eftersom de kan bestämmas genom provtagning och analys. Däremot är glacialvatten, sedimentvatten och salt (brine) vatten karaktärer som härletts, dvs inte kunnat bestämmas via provtagning och analys.

# Principal Komponentanalys

Principal  
Komponent 2



$$\text{Komponent 1} = -0.25 [\text{Na}] - 0.08 [\text{K}] - 0.23 [\text{Ca}] - 0.05 [\text{Mg}] + 0.11 [\text{HCO}_3] \\ - 0.24 [\text{Cl}] - 0.23 [\text{SO}_4] + 0.08 [^3\text{H}] - 0.03 [^2\text{H}] + 0.01 [^{18}\text{O}]$$

$$\text{Komponent 2} = -0.04 [\text{Na}] - 0.23 [\text{K}] + 0.05 [\text{Ca}] - 0.24 [\text{Mg}] - 0.16 [\text{HCO}_3] \\ + 0.02 [\text{Cl}] + 0.02 [\text{SO}_4] - 0.10 [^3\text{H}] - 0.27 [^2\text{H}] - 0.29 [^{18}\text{O}]$$

*Figur 9-3. M3 diagram, se avsnitt 9.7, över samtliga hydrokemiobservationer från Äspöområdet. Avståndet från en punkt till en referenspunkt är omvänt proportionellt mot andelen av referensvattnet i den punkten.*

Även om uppdelningen och fördelningen av de olika vattentyperna är enkel och rättfram finns det osäkerheter i resultaten. Till detta bidrar bland annat det faktum att det är svårt att avgöra hur stor del av den observerade blandningen som i själva verket är förorsakad av störningar från de genomförda undersökningarna. Det är borrning som ger de största störningarna. Vid all borrning är spolvattnet därför märkt med ett färgspårämne vilket gjort det möjligt att korrigera för störningen från själva borrningen. Däremot finns det inget sätt att korrigera för den kortslutning med medföljande blandning som borrhålet förorsakar då det penetrerar vattenförande sektioner med olika trycknivåer. Exempel på svårtolkade förhållanden är att vi återfinner tritium på stort djup, t ex på Äspö ner till

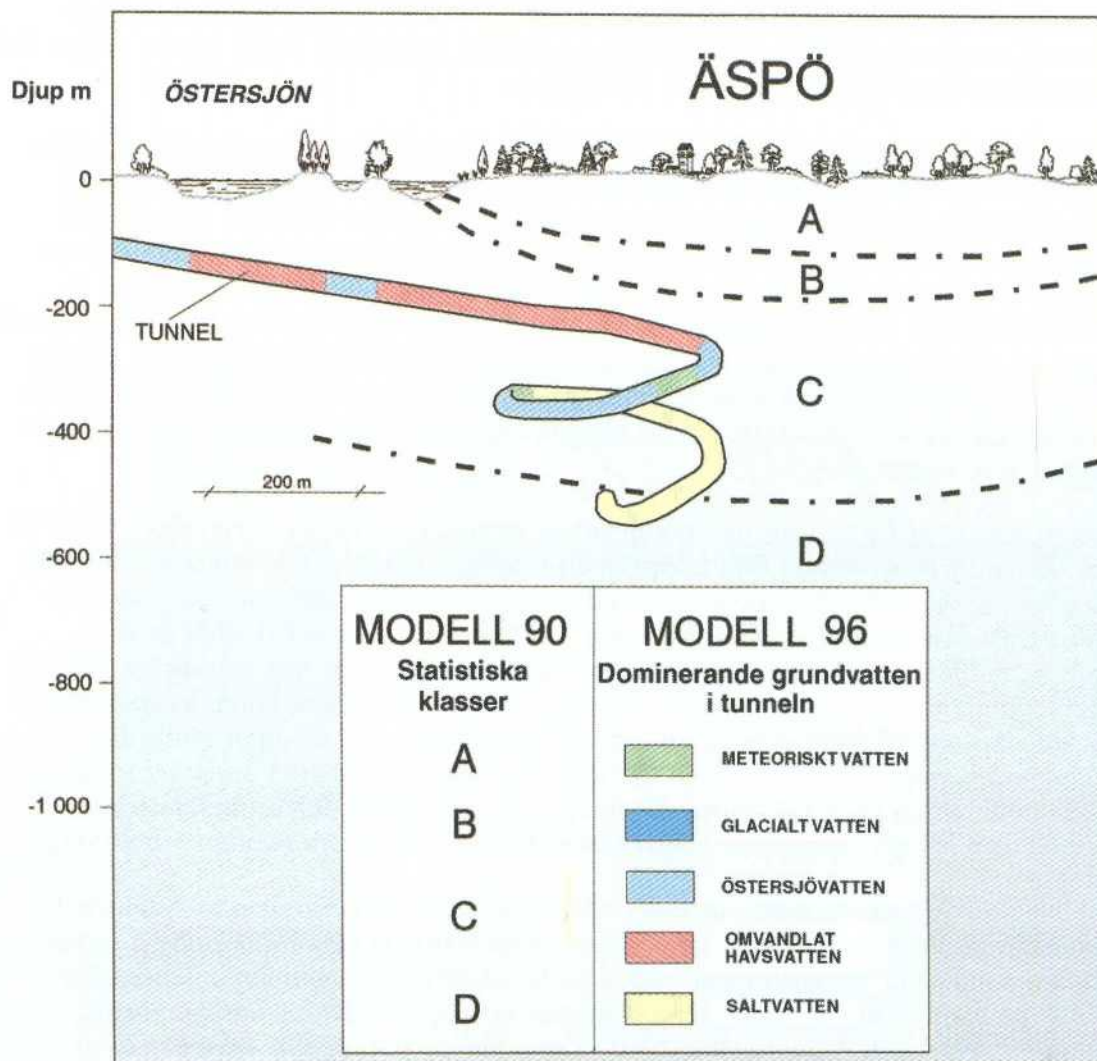
400 m djup och på Laxemar ännu djupare. Skulle dessa tritiumhalter vara relevanta, dvs inte förorsakade av borrhålen och mätningar, innebär det att vatten som infiltrerat under de senaste 40 åren har transporterats ner till nivåer på 400 m i Äspö och ännu djupare i Laxemar. Detta stämmer dåligt med andra iakttagelser och tolkningar som visar att vattnet på detta djup i övrigt består av stora andelar gammalt relikvt Östersjövatten, gammalt salt vatten och glacialt smältvatten.

I FUD 92 redogjordes ingående för hur vattnets kemiska sammansättning i kombination med olika stabila och radiogena isotoper kan användas för att bestämma grundvattnets omsättningstid. I FUD 95 angavs dessutom ett antal nyligen prövade och tilltänkta isotopmetoder som potentiellt mycket användbara. Efter att ha testat dessa metoder /9-1/ finns det dock i dagsläget ingen anledning att lyfta fram någon enskild isotopmetod som den som ger den mesta informationen. Det är snarare så att olika isotoper är lämpade för att identifiera olika processer. Det är därför kombinationen av en stor mängd olika metoder som tillsammans ger den bästa bilden. Tidsserier av utvalda högkvalitativa data från olika punkter underlättar tolkningen och minskar osäkerheterna (möjliga förklaringar till mätdata). I Figur 9-4 finns en jämförelse mellan den modell som fanns i slutet av förundersökningsfasen och den modell som gäller nu /9-2/.

Hydrokemiskt modelleringsarbete utgår alltid från uppmätta data. En första kvalitativ granskning av dessa leder fram till en förståelse för vilka processer som är aktiva och varför kemin ser ut som den gör. Beräkningar genomförs därefter i syfte att belägga eller förkasta de initiala antagandena. Successivt byggs beskrivningen ut och blir mer detaljerad med tiden. På så sätt är Modell 96 en fortsatt utveckling av Modell 90. Modell 96 är den modell över grundvattenkemin på Äspö som togs fram 1996 och som baserats på data från ytborrhål och borrhål från tunneln. Modell 90 är motsvarande modell, baserad på data från borrhål från markytan, framtagen 1990. I båda dessa finns 3 viktiga beståndsdelar, nämligen: 1) konceptuella modeller baserade på hur man tror att det ser ut nere i berget 2) interpoleringar av mätdata samt 3) resultat av matematiska beräkningar (t ex M3, se vidare under avsnitt modellutveckling). Illustrationerna i Figur 9-4 är en kombination av dessa.

Modell 96 är baserad på all den kunskap som erhållits från undersökningar och utvärderingar gjorda under tunnelkonstruktionsfasen. Den är därmed mer genomarbetad och mycket mer detaljerad än Modell 90. Figur 9-4 måste därför ses som ett försök att illustrera skillnader och likheter i modellerna snarare än att jämföra modellerna. Kortfattat kan man lista följande förbättringar från Modell 90 till Modell 96:

- Blandning av vatten med olika ursprung och sammansättning är den process som påverkat vattenkemin mest. I Figur 9-3 ser man att vissa vattentyper blandats med varandra, medan andra inte blandats. Detta har sin förklaring i de tidigare rådande hydrologiska förhållandena. T ex finns det en tydlig blandningslinje mellan brine och glacialvatten, mellan glacialvatten och meteoriskt vatten samt mellan Östersjövatten och glacialvatten. Däremot finns det inga punkter längs blandningslinjen mellan Östersjövatten och brine vatten. Samtliga dessa blandningar kan härledas till nu och tidigare rådande grundvatten(flödes) förhållanden.
- Avvikelser i enskilda ämnens koncentrationer mellan de uppmätta och de som beräknats utifrån blandningsproportionerna är kvantitativa mått på produkter av kemiska reaktioner. T ex kan på detta sätt omfattningen av jonbytesreaktioner och effekter av bakteriella nedbrytningsprocesser beräknas /9-1, 9-5/.



*Figur 9-4. En jämförelse mellan de modeller som upprättades över den grundvattenkemiska situationen på Aspö efter förundersökningsfasen och efter konstruktionsfasen.*

Vid en noggrann jämförelse av Modell 90 och Modell 96 i Figur 9-4 måste man också ta hänsyn till att vatteninflödet till tunneln har påverkat hydrokemin och gett en något annorlunda utbredning för de olika vattentyperna. I Figur 9-1 visas en jämförelse mellan salthaltsfördelningen före och efter tunnelkonstruktionen. Framför allt kan man konstatera en uppkonung av saltvatten till följd av avsänkningen i tunneln.

Modell 96 visar således hur man har ökat upplösningen i beskrivningen och kunskapen om grundvattenförhållanden. För en enklaste möjliga jämförelse kan man säga klass A i Modell 90 motsvaras av meteoriskt vatten i Modell 96. Det är den enda direkta motsvarigheten i båda modellerna. Glacialvatten, som är en viktig komponent i Modell 96, har ingen direkt motsvarighet i Modell 90, även om ett inslag av kallt (glacial) vatten kunde skönjas i syre-18 isotopdata /9-6/. Uppdelningen mellan (gammalt och ungt) Östersjövatten och omvandlat havsvatten i Modell 96 motsvaras i Modell 90 av klass C. Klass D motsvaras i stort av salt vatten.

Den största skillnaden är ändå att Modell 90 beskriver en klasstillhörighet i ett djupintervall, medan Modell 96 anger andelen av de olika typvattnen i varje punkt, i Figur 9-4 exemplifierad med den dominerande vattentypen.

I FUD 95 presenterades en plan för att standardisera metoder och verktyg för modellering och visualisering av hydrokemiska data. Figur 9-1 är exempel på en kombinerad interpolering och visualisering med en programvara som heter VOXEL analyst. Med hjälp av dessa bilder har det varit möjligt att i en vidare krets presentera och diskutera resultat som annars endast kommit att diskuteras i en snäv krets av de som utfört modelleringarna. De interpolerade bilderna har naturligtvis osäkerheter men är en metod att på ett enkelt sätt informera om hur vattenkemin är rumsligt fördelad. Dessa arbeten kommer att fortgå med målet att kunna integrera programvaran för VOXEL med RVS, en programvara som utvecklats för 3D modellering med direkt anslutning till databasen SICADA, se avsnitt 14.4.3.

Integrering av hydro-, kemi- och isotopdata är ett insatsområde som nämndes i FUD 95 och där en ny programvara (M3 koden) har utvecklats, testats och kommer att tillämpas framöver, se vidare under program. I dagsläget kan kunskapen sammanfattas i att den omfattande blandning som kemi och isotopdata antyder endast delvis stöds av de grundvattenflödessimuleringar som genomförts /9-7/. Det finns spår av tidigare rådande flödesregimer dvs grundvatten typer som enligt flödessimuleringar borde ha spolats bort. En anledningen till detta är sannolikt att tryckförhållandena (som utgör randvillkor vid flödesmodelleringar) varierat och att de flödesriktningar som råder i dagsläget endast har förekommit en kort tid. En annan anledning är att den lågkonduktiva bergmatrisen förmodligen har ett "minne" av tidigare förhållanden, dvs grundvattensammansättning.

De matematiska och statistiska metoder som använts vid utvärderingen av Äspödata har testats för att utröna deras förmåga att beskriva de hydrokemiska förhållandena på en tilltänkt kandidatplats, redan innan någon undersökning har genomförts. Arbetet har utförts på basis av alla de data som samlats från de tidiga KBS-3-undersökningarna, Finnsjöprojektet och Äspöprojektet /9-8/. Turvis har en av platserna uteslutits ur databasen som därefter använts för att beskriva hydrokemin på den uteslutna platsen. Detta har genomförts för samtliga undersökta platser: Äspö, Finnsjön, Gideå, Fjällveden, Klipperås, Kamlunga, SFR, Stripa, Svartboberget, Lansjärv, Taavinunnanen m fl. Därefter jämförs de predikterade värdena med de uppmätta. Två väsentliga resultat av detta arbete är att:

- spridningen i de predikterade värdena för varje plats är större än variabilitet i uppmätta data på någon av platserna,
- ytvattenkemin, som också inkluderats från SGU:s brunnsarkiv, kan inte användas för att beskriva djupförhållandena.

Slutsatsen är därför att den statistiska bearbetningen trots allt inte ger en bättre bild av de kemiska förhållandena på en plats. Eftersom denna bearbetning omfattat alla SKB:s grundvattenkemidata måste man också ha i minnet att kvalitén varierar kraftigt. Representativiteten var låg hos de vattenprov som togs tidigare (70- och 80-talet), 15 %, jämfört med de tagna på Äspö (90-talet), 60 %.

Andra metoder kommer i fortsättningen att testas för att hitta lämpliga metoder för att prediktera grundvattenkemin, se Program.

## 9.3 Viktiga fysikaliska processer

### 9.3.1 Blandning

Grundvattnet rör sig i bergets spricksystem för att utjämna rådande tryckdifferenser, snabbt i partier med en hög genomsläpplighet och långsamt i tätare partier. Därigenom kommer flödet att koncentreras till enstaka flödesvägar med god genomsläpplighet. Dessa vägar i sin tur korsar varandra och går ihop och isär oavbrutet. Därigenom kommer det vatten som rör sig i flödesvägarna att blandas. Under statiska förhållanden med konstanta drivkrafter kommer skillnaden i kemin hos de vatten som blandas att vara liten. Däremot kommer stora skillnader att förekomma i de fall då flödesfältet ändrar riktning och vatten av en helt annan typ kommer in i flödesvägarna. Det är vid sådana händelser som effekten av blandning är som störst. Läget för och storleken av inströmning och utströmning av grundvatten, samt storleken av hydraulisk potential (dvs tryckskillnaden) är de faktorer som bestämmer blandningsförhållandena. Som exempel på kontraster i detta hänseende kan nämnas den kraftiga trycknivåskillnad som kan förekomma mellan olika delar under en glaciär i jämförelse med den fullständiga utjämning som råder under havsnivån.

Efter den senaste istiden har Östersjöns olika stadier påverkat grundvattnets blandning i olika grad beroende på var platserna ligger i förhållande till kustlinjen. Ur detta kan man också härleda de förhållanden som rått vid olika tillfällen. I samband med inlandsisens avsmältning trängde glacialt vatten ner i berggrunden och blandade sig med det vatten som redan fanns där. Det är omöjligt att sätta en gräns för hur djupt glacialvattnet nådde, men det finns en nivå kring 100–300 m djup där man i allmänhet finner en stor andel av vatten som infiltrerat under kalla klimatförhållanden. Glacialvatten som förekommer på större djup kan ha sitt ursprung i någon tidigare glaciation. På platser som någon gång varit havstäckta sedan istiden ser man i allmänhet inslag av gammalt havsvatten. I vissa fall kan det dock vara så att inslaget av havsvatten är relativt litet och att salt vatten på djupet i stället härrör från en s k brine, ett mycket salt vatten som funnits i berget i miljontals år. Per definition är vattnet en brine då den totala salthalten överstiger 100 g/l, dvs 10 %, oavsett dess ursprung.

Vattenkemin visar att områden som varit täckta av hav också infiltrerats av havsvatten. Drivkraften för infiltrationen är den högre densiteten hos salt vatten som trängt ner i berget till det djup där salthalten är lika hög. Landhöjningen har sedan gjort att tidigare havstäckta platser kommit ovanför havsytan och därmed utsatta för en in- och utströmning som styrs av nederbörden och grundvattenytans nivå.

Tidskonstanten för dessa olika blandningsfenomen är alltså okänd. Pågående forskningsarbete syftar till att klarlägga hur stabila blandningsförhållandena är och hur dessa kommer att förändras i tiden, se program för nästa sexårsperiod.

### 9.3.2 Diffusion

Om grundvattnet rör sig mycket långsamt kommer diffusionen att kontrollera transporten av lösta ämnen. Man kan då tala om stagnanta förhållanden, dvs att grundvattnet är stillastående. Definitionen för *stagnant vatten* är således att detta inträffar då upplösta ämnen transporteras snabbare genom diffusion än genom vattenflöde (advektion). Hur stillastående vattnet är beror av i vilken tidsskala man betraktar det. I detta sammanhang betecknar *orörligt* att inga stora förändringar skett i och under en glaciationscykel eller ännu längre tider. Dessa förhållanden kan uppnås i två olika sammanhang. Dels på stort djup där regionala storskaliga förhållanden dominerar över de lokal tryckgradienterna och



dels i täta bergpartier där lokala tryckgradienter inte förmår transportera vattnet. Ett villkor för att detta skall ske är att produkten av tryckgradienten och den hydrauliska konduktiviteten är lägre än diffusiviteten i vatten för de lösta salterna, dvs diffusion dominerar över advektion då diffusiviteten är större än darcyflödet. I bergpartier utanför vattenledande strukturer är detta ofta fallet /9-9/.

Brines förekommer och påträffas överallt där man borrar ner till stora djup. Djupet varierar däremot kraftigt från några enstaka 100 m till flera km. Det visar därmed hur djupt de ytliga circulationscellerna nått någon gång efter att brinen bildats. Detta kan ligga miljontals år tillbaka i tiden. Därför innebär frånvaro av brine inte med nödvändighet att sena cirkulationer av ytvatten har förekommit, däremot att det någon gång efter att bergarterna bildats har förekommit vattenomsättning på detta djup. Att brines förekommer är en tydlig indikator för att stagnanta förhållanden råder.

Brines kan bildas på flera olika sätt. Man skiljer mellan sådana som bildats i berget, *autoktont*, eller sådana som bildats utanför och senare transporterats ner i berget, *alloktont*, t ex upplösning av evaporiter /9-10/. Olika möjliga ursprung för dessa har diskuterats av Lampén /9-11/. Man kan inte avgöra om det ena eller det andra ursprunget är mera troligt. Antagligen förekommer båda. Säkert är dock att en brine på stora djup i kristallint berg alltid är mycket gammal och därmed kan anses stagnant. De förhållanden vi ser idag kommer att förbli oförändrade under den geologiskt sett korta tid som gäller för säker deponering av kärnavfall.

### 9.3.3 Gasbildning

Grundvattnet innehåller varierande mängd löst gas. Oftast dominerar kväve i en halt av 80 % följt av metan, helium, argon och koldioxid i mycket lägre halter. I enstaka fall kan även höga halter av vätgas och metan förekomma. Den totala mängden löst gas ligger oftast i intervallet 1–5 volymprocent (vid NTP) och är generellt högre mot djupet. Naturligt förekommande gashalter innebär att gasen går ur lösning och bildar en separat gasfas vid ett djup av mellan 13 och 50 m, ifall vattnet transporteras uppåt.

Gasens ursprung är alltså oklar. Det finns flera tänkbara förklaringar:

- luftmättat infiltrerat ytvatten,
- resultat av mikrobiell aktivitet,
- upptransporterad gas från jordens inre.

Eftersom sammansättningen med undantag för syre, ofta stämmer överens med luftens gasblandning ligger det nära till hands att anta att mycket gas härrör från luftmättat vatten som infiltrerat berggrunden. Emellertid är halten löst gas nästan alltid högre än vad som kan lösas under atmosfärstryck.

Vid de finländska platsundersökningarna på Olkiluoto har betydligt högre gashalter påträffats, upp till 2 l löst gas (NTP) per liter vatten. I dessa fall dominerar metan.

## 9.4 Viktiga processer i samverkan grundvatten-mineral

De vatten-mineral processer som påverkar grundvattnets sammansättningen är:

- Jämvikt med mineral på sprickor och i bergmatrisen.

- Ytreaktioner; jonbyte och sorption.
- Bakteriellt medierade reaktioner.
- Upplösning och utfällning av mineral.

I dagsläget är vår kunskap om vilka reaktioner som dominerar sådan att vi kan betrakta jämvikt mellan ämnen lösta i vatten och aluminiumsilikater i berget och sprickbeläggningarna som betydelslös. Vid rådande (låga) grundvattentemperaturer är det endast ett fåtal upplösnings- och utfällningsreaktioner som uppnår jämvikt, nämligen de som avser kalcit, gips, fluorit pyrit och vissa järnmineral faser. Dessa i sin tur kan påverka halterna av andra ämnen genom medfällning och sorption.

Jonbyte och sorption har visat sig ha en stor betydelse i salt grundvatten /9-12/. Anledningen till detta är att kapaciteten i utbytet ofta är proportionell mot halten i vattnet, dvs lermineral som laddats med kalcium under en sötvattendominerad fas har kapacitet att byta ut allt natrium även i ett havsvatten då det infiltrerar berggrunden. Då gäller även att andra katjoner, som i sötvattensituationer har en stark benägenhet att fastna, kommer att bindas mycket svagare under saltvattenförhållanden. Den nya kunskapen kommer från undersökningar i vattenförande sprickor som gjorts i Äspötunneln vilka visat att mängden lermineral i sprickorna är betydligt större än man anat. Ny skonsammare borrhäknings teknik gör det möjligt att få borrhäknings kärnor där lermineralen finns kvar i sprickorna. Lermineralen har hög jonbyteskapacitet.

I berget finns vatten och restprodukter som inte fick plats i kristallgittret då bergarterna bildades, t ex klorid, natrium och kalcium. Detta vatten innehåller stora mängder lösta salter, främst de tidigare nämnda natrium, kalcium och klorid. Om salthalten överstiger 10 %, dvs 100 g/l talar man om brine /9-10/. I ett sådant vatten råder i allmänhet stagnanta förhållanden på grund av dess höga densitet och med tiden uppnår vattnet en ännu högre täthet genom att mera salt lakas ur bergmatrisen. Vattnet blir därigenom ännu mer obenäget att röra sig.

I icke salt grundvatten är en ökande grad av kemisk jämvikt en indikation på att vattnet är stagnant. Även i detta fall kan man utgå ifrån ett antagande om att de nu rådande förhållandena är konstanta och därifrån analysera hur förändringar i de hydrologiska förhållandena påverkar situationen.

#### 9.4.1 pH-utveckling

Grundvattnets pH ligger vanligtvis i intervallet 6.5–9.5. Variationer förekommer mellan olika platser medan variationen inom en och samma plats är mycket mindre. Endast undantagsvis är pH-värdet högre än 9 och då i samband med djupt icke salint vatten. Motsatsen, dvs pH-värden under 7 förekommer i samband med omfattande mikrobiell aktivitet i ytligt grundvatten och ibland i mycket djupa (under 1000 m) salta grundvatten.

Av störst betydelse för pH värdet i det infiltrerande grundvattnet är reaktioner mellan koldioxid löst i vattnet och kalcitmineral i bergets spricksystem. Karbonatsystemet befinner sig i ett jämviktsstillstånd och karbonatjonerna ger vattnet dess pH-buffrande effekt /9-13/. Den totala karbonathalten ligger ofta i intervallet 100–300 mg/l och överstiger sällan 600 mg/l. Extremt höga karbonathalter kan förekomma som resultat av biologisk aktivitet. Halter på 1000 mg/l har vid enstaka tillfällen registrerats. De biologiska processerna har då även buffrat pH till 7.

Mot större djup minskar vanligtvis karbonathalten och salthalten ökar. Även i icke salta djupa vatten sjunker karbonathalten som en indirekt effekt av ökande pH. Det höga pH värdet anses vara resultat av fältspatvittring. Vid vittringen frigörs kalcium som genom utfällning av kalcit sänker karbonathalten. Salta grundvatten som legat isolerade under lång tid har i allmänhet ett lägre pH än icke salta stagnanta vatten. Anledningen kan vara att vätejoner som sitter i mineralskikten kan ersättas av katjoner i vattnet så att pH aldrig blir lika högt /9-14/.

I grundvattnet finns den pH buffrande förmågan hos karbonatsystemet. Denna kapacitet är dock liten i förhållande till buffertkapaciteten i mineralerna. Den mängd kalcit som sitter på sprickytorna har större betydelse för att buffra mot t ex försurning än karbonaterna i vattenfasen. Lika stor kapacitet finns i fältspater som även de kan buffra mot en försurning.

#### 9.4.2 Redox-utveckling

Redoxförhållandena i berget och grundvattnet har en central betydelse för djupförvaring av kärnavfall. Detta för att oxiderande förhållanden ökar korrosionen av kopparkapseln och dessutom att vissa radionuklider vid ett eventuellt läckage kommer att transporteras både snabbare och i högre halter i oxiderande än i reducerande miljö. Baserat på data från SKB:s platsundersökningar är, vid rådande förhållanden, grundvattnet reducerande på förvaringsdjup (500 m). Det syre som finns i ytvattnet konsumeras antingen genom mikrobiellt katalyserade processer eller genom oxidering av huvudsakligen Fe(II)- eller sulfidmineral. Dessa processer äger rum antingen i jordtäcket eller i ytnära i berggrunden. Till vilket djup i berget som oxiderat grundvatten kan nå beror alltså på jordlagrens sammansättning och tjocklek (t ex halt av organiskt material, finkornigt/grovkornigt etc) och på sprickornas mineraliseringar, och sist men inte minst på den hydrauliska drivkraften (dvs grundvattenflödets hastighet och riktning). Vid konstruktionen av ett djupförvar kommer den hydrauliska drivkraften att ändras så att flödet in mot tunnarna ökar. Detta innebär sannolikt att mer ytvatten (eventuellt syresatt) kommer att nå bergets spricksystem. Det storskaliga redoxexperimentet som genomfördes under tunnelkonstruktionsfasen i Äspö-laboratoriet efterliknade dessa förhållanden och klargjorde bakteriernas betydelse. Det visade sig att dessa kan anpassa sig snabbt till ändrade förhållanden /9-15/.

Det har spekulerats i att den ökning av hydraulisk drivkraft, tillsammans med den nedgång i organisk produktion som beräknas inträffa till följd av en glaciation kraftigt kommer att öka ned transporten av syresatt vatten i berget. Det pågår för närvarande beräkningar av hur långt sådant syresatt vatten kan tänkas nå. Preliminära resultat visar att utfallet är starkt beroende av vilket grundvattenflöde man ansätter i beräkningarna. För att ytterligare klarlägga effekterna av tidigare glaciationer är det därför av intresse att:

- bestämma rådande djup för övergångszonen mellan oxiderande och reducerande förhållanden i berget/jordlagren,
- bestämma till vilket maximalt djup syresatt vatten har påverkat berget/sprickmineralen under t ex tidigare glaciationer,
- bestämma reduktionskapacitet i bergets sprickor som tas i anspråk vid ett ökat inflöde av syrehaltigt vatten.

Redoxutvecklingen i förvaret efter förslutning kommer att vara beroende av hur förvaret är byggt, hur vatten kommer in i anläggningen och vilka (rest)material som blir kvar när anläggningen försluts.

Under ostörda förhållanden, som råder innan förvaret byggs och som förväntas återinträda en tid efter förslutning, kan man utgå ifrån att miljön är reducerande och att grundvattnets Eh-värde bestäms av järn och sulfidmineral i berget och ligger på en nivå som gör att uran (teknium, neptunium och plutonium) förekommer i reducerad svårslöslig form. Eh-värdet kommer då att vara kopplat till pH-värdet och variera inom intervallet -100 till -400 mV, för pH-värden i intervallet 7-9.

Redoxbuffertkapaciteten kommer att ligga i de tillgängliga järn- och sulfidmineralen i sprickorna. Åtskilliga experiment har genomförts både för att utreda reaktionskinetiken /9-16/ och reaktionskapaciteten /9-17/ hos järnhaltiga mineral. Inom ramen för det pågående REX-experimentet (se avsnitt 14.3.3) genomförs också labexperiment, både med och utan bakterier närvarande.

### 9.4.3 Mikrobiella processer

Grundvattnets kemi påverkas av kemiska reaktioner och av mikrober. Mikrobernas betydelse har på senare tid uppmärksammats och kartlagts i större detalj än tidigare (se även avsnitt 10.5). Den viktigaste enskilda lärdomen är att bakterierna snabbt förbrukar löst syre i infiltrerat grundvatten. Det är därmed klarlagt att under öppethållande kommer inget löst syre att transporteras ner till förvaringsnivå med grundvattnet /9-15/. En annan viktig lärdom är att bakteriell sulfatreduktion kan producera sulfid i halter som överstiger de som normalt förekommer i grundvatten /9-5/.

Under konstruktions- och driftsfasen kommer inflödet av grundvatten till anläggningen att påverka redoxförhållandena. Den ökande vattenomsättningen i berget ovanför förvaret förväntas dock inte nämnvärt påverka vattnets redoxegenskaper. Anledningen är att ett ökat flöde av ytligt syresatt vatten kommer att balanseras av mikroberna så att allt tillgängligt organsikt material ändå förbrukas. Stökiometriskt räcker det med 4 mg/l organiskt material av sammansättningen  $\text{CH}_2\text{O}$  för att reducera 10 mg/l löst syre. Om halten organsikt material är högre kommer reduktion av trevärt järn och sulfat att ta vid då syret förbrukats /9-18/.

I förvaret finns luftsyre som kommer i kontakt med mineral på väggarna och vatten som hela tiden kommer in i anläggningen så länge den hålls öppen. Eftersom allt vatten flödar mot anläggningen finns det ingen anledning till att syret skall gå in i berget, så det enda syre som blir kvar vid förslutning är det som finns i tunnlarna och i mikrosprickorna i en begränsad zon kring tunnlarna. Hur det kommer att reagera är beroende av flera faktorer. Generellt kan man se följande processer:

- Halterna av organiskt material i det inströmmande vattnet kan vara lågt, men om det finns rester av organiskt material efter förslutning kommer med stor säkerhet en bakteriellt styrd syreförbrukning att ske.
- Då allt syre förbrukats kommer de mikrobiella processerna att fortsätta och omvandla järn(III)mineral till tvåvärt järn och sulfat till sulfid. Omfattningen av dessa reaktioner är beroende av tillgång på de olika komponenterna.

- En viktig faktor att ta hänsyn till gäller mängden av organiskt material i form av bakteriemattor på tunnelväggar och i dräneringsdiken som blir kvar vid förslutning. Detta material utgör substrat för fortsatt bakteriell aktivitet också efter förslutning.

#### 9.4.4 Kolloidbildning

Kolloider förekommer i ytligt vatten men är sällsynt i djupa grundvatten. De består av olika slags små partiklar som inte sedimenterar. Kolloider kan bildas i samband med utfällningsreaktioner, t ex då två olika typer av vatten blandas och en övermättnad uppstår. En annan källa för kolloider är vittring av mineral. Eftersom de naturliga halterna av kolloidalt material i djupa grundvatten är så låga /9-19/, kan man dra slutsatsen att normala processer i form av blandning och utfällning eller kemisk vittring inte genererar sådana koncentrationer av kolloider att det skulle få betydelse för djupförvarets säkerhet (se även avsnitt 10.3). En typ av störning som ger upphov till en omfattande kolloidbildning i djupt grundvatten är inblandning av luftsyre. Efter förslutning kan man därför tänka sig att vattnet under en övergångstid innehåller förhöjda halter av kolloidalt material.

#### 9.4.5 Upplösning och utfällning av sprickmineral

Reaktioner mellan vatten och mineral ger upphov till omvandling av primära till sekundära mineralfaser. Det kallas kemisk vittring och de sekundära mineralfaserna utgörs bland annat av olika slags lermineral. I uppkrossade partier, där både mekanisk och kemisk påverkan förekommit vid olika tillfällen sedan berget bildades, finns det en stor mängd olika sekundära sprickfyllnadsmineral. Vid en noggrann kartering kan man se i vilken sekvens dessa har bildats /9-20/. Det är dock vanligtvis svårt att avgöra när och under vilka förhållanden det skett. Genomgående gäller att de allra flesta sprickfyllnadsmineral har uppkommit under hydrotermala förhållanden långt tillbaka i tiden.

På enskilda sprickytor finns även utfällda mineral som bildats genom att vatten av olika sammansättning blandats. Sådana utfällningar är kalcit, gips, siderit, pyrit, fluorit och vissa järnoxider. Dessa mineralfasers existens gör att man kan dra slutsatser om vilken vattenkemi som rått i samband med att de bildades. Däremot kan den motsatta effekten, upplösning av sprickmineral varken identifieras eller kvantifieras. T ex kan en snabb transport av ett koldioxidrikt vatten relativt snabbt lösa upp kalcit i en flödesväg och vid blandning med ett annat vatten fälla ut kalcit på sprickytorna. En jämförelse med förhållandena i en likartad spricka på större djup, där kalcit fortfarande förekommer kan ge viss värdefull upplysning om upplösningshastigheten och därmed grundvattenomsättningen /9-21/.

Kalcitmineral är en speciellt användbar indikator för inströmning av nybildat grundvatten. I områden där koldioxidrikt grundvatten infiltrerat berggrunden ser man att kalcitupplösning förekommit ner till ca 100 m djup. I de vattenförande sprickorna kan man uppskatta andelen av kalciter i sprickmineral till storleksordningen 5-40 %. Därav kan man dra den slutsatsen att kalcitmineral är en verksam och effektiv buffert mot infiltrerande surt grundvatten. Olika analyser har även utförts med syfte att beskriva hur en försurning kommer att påverka grundvattenkemin på förvarsnivå /9-22/. Slutsatserna är att kapaciteten hos bergets mineral är tillräcklig för att buffra mot varje tänkbart försurningsscenario.

SKB deltar i EU projektet EQUIP som har som mål att testa nya instrument och metoder för detaljerade mineralanalyser och att använda resultaten för att utvärdera tidigare rådande grundvatten kemi och flödesförhållanden, se vidare under avsnitt 16.1.

## 9.5 Grundvattenkemisk provtagning och analys

SKB:s program och utrustning för provtagning och analys av grundvatten har genomgått en omfattande utveckling från tiden för typområdesundersökningarna fram till Äspö-laboratoriet. Efter avslutade förundersökningar och inför byggskedet i Äspöprojektet inrättades provtagnings- och analysklasser för att underlätta och styra den provtagning som genomfördes i tunneln. Dessa kommer att utnyttjas även vid kommande platsundersökningar (se tabellen nedan).

---

**Klass 1: Enkel provtagning för kontroll av tidsstabilitet.**

- Elektrisk konduktivitet, pH, uranin\*

**Klass 2: Enkel provtagning för typklassning.**

- Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO<sub>3</sub>, uranin\*

*Tillval:* <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>18</sup>O

- Frysprov arkiveras

**Klass 3: Enkel provtagning för bestämning av huvudkomponenter (ej redox).**

Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Br, uranin\*, katjoner (utom Fe, Mn)\*\* och SO<sub>4</sub> analyserat som svavel med ICP-AES.

*Tillval:* <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>18</sup>O

- Frysprov arkiveras

**Klass 4: Omfattande provtagning för fullständig hydrokemisk karakterisering.**

- Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Br, Fe (totalt, tvåvärt), uranin\*, DOC, katjoner\*\* och SO<sub>4</sub> som sulfat med ICP-AES, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>18</sup>O

- Frysprov arkiveras både surgjort och okonserverat

*Tillval:* HS, NH<sub>4</sub>

**Klass 5: Omfattande provtagning för fullständig hydrokemisk karakterisering inklusive specialanalyser.**

- Elektrisk konduktivitet, pH, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Br, F, Fe (total, tvåvärt), uranin\*, DOC, kationer\*\* och SO<sub>4</sub> som svavel, HS, NH<sub>4</sub>, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H, <sup>18</sup>O

- Frysprov arkiveras både surgjort och okonserverat

*Tillval:* NO<sub>2</sub> (eller NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>), PO<sub>4</sub>, I och TOC

- <sup>14</sup>C-ålder (Percent Modern Carbon), <sup>13</sup>C promille PDB (Peedee Belemnite, standard)

- U och Th (elementanalys och/eller isotoper)

- andra spårmetaller (INAA and / or ICP-MS)

- Isotoperna <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra och <sup>222</sup>Rn
- 

\*) Bestäms endast då Uranin använts som markör för borratten (spolvatten).

\*\*) Katjoner: Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn, Li och Sr.

## 9.6 Mål och program

Insatserna under den nästkommande sexårs perioden 1999-2004 inriktas på en bättre integrering av de geohydrologiska förhållandena vid hydrogeokemiska analyser och utvärderingar. Målen är att:

- bestämma vilka kemiska förändringar i den naturliga miljön, som förvaret kan åstadkomma i närområdet till följd av byggande och öppethållande,
- bedöma möjliga förändringar i de kemiska förhållandena i ett förvarsområde över förvarets livslängd,
- underbygga modellerna för vattenströmning och transport i berget genom att härleda tidigare rådande flödesförhållanden.

Insatser som syftar till att få bättre kunskap om barriärsfunktionerna är viktigare än demonstrationsaspekten. De barriärsfunktioner som påverkar och påverkas av hydrokemin är isolering (avgörande betydelse), retention (stor betydelse) och utspädning (viss betydelse). Förståelse, predikterbarhet och teknik för genomförande kommer att tillmätas större vikt än kompetenshållning och värdet av expertutlåtanden.

Specifika insatser på undersökningssidan omfattar följande:

- Testning och vidareutveckling av ny och befintlig utrustning för vattenprovtagning i borrhål borrade från markytan och underjordsanläggningar, underjord även i lågkonduktivt berg ( $K < 10^{-10}$  m/s).
- Undersökningar av sprickmineralens sammansättning och förekomst fokuserade på tidigare rådande hydrokemiska förhållanden, på redoxförhållanden, på jonbyteskapacitet och på nuklidmigrations-modellering.
- Laboratorie- och fältexperiment med syfte att klarlägga kinetiken i kalcitsystemet och dess respons till pH förändringar.
- Provtagning, analys och datasammanställning för att se var och hur ofta djupt grundvattnen, även djupt liggande saltvatten, transporteras upp till markytan.
- Samla tidsserier av isotopdata för nederbörd och kemidata från observationsborrhål.

Att minimera störningar på grundvattenkemin, för att kunna säkerställa användbara data, är ett fortsatt viktigt arbetsområde som ingår i planering av program för platsundersökningar. Det är nödvändigt att avsätta tillräckligt med tid för att erhålla hög kvalitet på grundvattenproverna och att veta vilka faktorer som allvarligt kan försvåra möjligheten att få prov av hög kvalitet. Kemiprovtagningar som genomförs med SKB:s kemiutrustning i bland annat Palmottuprojektet ger ytterligare kunskap och lärdom om vilka förhållanden som är viktiga. En tydligare fokusering av insatserna vid kärnkartering på de mineral som kan användas för att tolka tidigare rådande förhållanden planeras ingå i programmet.

De specifika större modelleringsinsatserna är i prioritetsordning:

- Att inom ramen för "Äspö Task Force for Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes" genomföra en kombinerade hydro- och kemimodelleringen av grundvattensituationen kring Äspö under och efter tunnelkonstruktionsfasen, se program för Äspölaboratoriet.

- Att genomföra utvärderingen av tidigare rådande hydrokemiska förhållanden inom ramen för det pågående EQUIP-projektet (EU), se program för Äspölaboratoriet.
- Att utnyttja Äspö Task Force och EQUIP modelleringarna för att beskriva möjliga utvecklingsscenarier för vattenkemin på Äspö i tidsperspektivet, 100, 1000, 10 0000 till 100 000 år framåt.
- Att koppla geokemiska, hydrokemiska, isotopkemiska och geohydrologiska beskrivningar till en prediktiv modell och testa dess förmågan att beskriva förhållandena på en okänd plats.
- Att klarlägga kalcitens betydelse och kinetik då det gäller att täta till och öppna upp vattenförande sprickor vid förändrade hydrokemiska förhållanden, t ex vid öppethållande av ett djupförvar.

Arbetet kommer att genomföras inom ramen för befintliga och nya delprogram eller projekt.

Modellering av möjliga hydrokemiska förändringar över förvarets livslängd är ett pågående samarbetsprojekt med Posiva inom ramen för deras deltagande i Äspölaboratoriet. I detta ingår även att provta och analysera grundvatten från lågkonduktivt berg och djupt liggande salt vatten. Den centrala frågan i projektet gäller stabiliteten i tid och rum hos de mycket salta grundvatten som påträffats på ca 1000 m djup i Laxemar och på Olkiluoto, en av Posivas kandidatplatser. En viktig fråga är: Kan vattnet vid något tillfälle i framtiden transporteras upp till en förvarsnivå på ca 500 m djup? Posiva skall enligt plan välja förvaringsplats år 2000 och Olkiluoto är en av kandidatplatserna.

Ett delprogram med sikte på hydrokemisk platsutvärdering kommer att genomföras i olika steg. I första hand skall de senaste data från djupborrhålet KLX02 tas omhand och utvärderas tillsammans med tidigare data från samma borrhål samt förhållanden på Äspö. De viktigaste frågorna i denna utvärdering är:

- Är data representativa och tillförlitliga?
- Finns det ett regionalt flöde i det djupa grundvattnet?
- Vilka förändringarna i tiden förorsakar avsänkningen från Äspötunneln?

I nästa steg kommer hela områdets kemiska situation att utvärderas och relateras till förhållandena i närheten, dvs det man vet om Kråkemåla och Klipperås.

Ett nytt program kommer att innefatta identifiering av de för hydrokemin mest betydelsefulla processerna baserat på resultat från samtliga (M3) modelleringar som utförts. Vi avser att koppla de hydrologiska beskrivningarna till de hydro-geokemiska och att utveckla M3 koden så att den kan användas för prediktioner av förhållandena på en plats. För detta krävs en programrutin som gör det möjligt att göra en direkt modellering, i motsats till den inversa modellering som programmet nu används till. Samtidigt vill vi få en bättre bild av osäkerheterna i M3 konceptet och kunna avgöra hur stora variationer det finns hos de antagna typvattnen, exempelvis syre-18 halten i glacialt smältvatten och i vanligt meteoriskt vatten.

Ett pågående doktorandprojekt utreder kinetiken i kalcitsystemet. Arbetet som inledde 1997 beräknas pågå fram till år 2000. Som avslutningen planeras ett fältexperiment troligen på Äspö, där vattenkemin (speciellt pH) skall varieras för att responsen i kalcitsystemet skall kunna studeras.



Det internationella samarbetet som inletts på hydrokemiområdet genom mötena i serien Äspö Geochemistry Workshops kommer att fortsätta dels genom de redan pågående Task #5 modelleringen och i EQUIP projektet. Dessutom kommer vi att delta i projekt ledda av IAEA och OECD/NEA i en högre utsträckning än tidigare.

## 9.7 Hydrokemiska modellverktyg

### 9.7.1 Koncept

Modellering av grundvattnets kemi baseras ofta på jämviktsmodeller och antagande om att bergets mineral bestämmer vattensammansättningen. Antingen genom att man antar ett stationärt system där en fullständig jämvikt råder i hela systemet, eller att man efterliknar en transport där vattnet successivt jämviktas med olika mineraler. Det förra kallas för jämviktsmodellering och det senare "reaction path" modellering, dvs reaktionsvägsmodellering. Det existerar idag ett antal tillförlitliga jämvikts och reaktionsvägskoder som är speciellt utvecklade för beräkningar i vatten-mineral system. De vanligaste jämviktskoderna är EQ 3, EQUIL, WATEQ, PHREEQE, m fl. Bland de vanligaste reaktionsvägskoderna kan nämnas EQ 6, PHREEQEF och NETPATH. Dessa koder är samtliga försedda med sin egen termodynamiska databas.

Vid utvärdering av Äspö data utfördes initialt både jämvikts- och reaktionsvägsmodelleringar /9-6/. Det visade sig dock att kemin i stor utsträckning kunde beskrivas som resultat av blandningar, där fler än två vattentyper ingår. Därmed var det också nödvändigt att beräkna blandningsproportionerna med flera komponenter samtidigt.

### 9.7.2 Metod

Hydrokemiska utvärderingar är vanligtvis ett komplext arbete som utförs av specialister. Resultatet av detta arbete presenteras ofta i form av subjektiva kvalitativa modeller och processbeskrivningar. För att underlätta denna utvärdering och utföra den på ett objektivt och kvantitativt sätt så har en matematisk metod utvecklats. Den bygger på multivariat-analys följt av blandningsberäkningar. Det utvecklade datorprogrammet liksom idén kallas M3 (Multivariate Mixing and Mass balance calculations) och kan användas för att spåra grundvattnets ursprung, beräkna blandningsproportioner samt för att utföra massbalansberäkningar även i sådana fall där grundvattendata annars är svårtolkade. Grundvattensammansättningen, som traditionellt använts för att beskriva reaktioner som sker i berggrunden, kan nu med ökad noggrannhet även användas för att spåra moderna eller forntida grundvattenflödens effekter på grundvattenkemin.

M3-modellen är en så kallad grundvattenresponsmodell, vilket betyder att förändringarna i grundvattenkemin undersöks i förhållande till en idealisk blandningsmodell, som konstrueras för det aktuella området. Komplexiteten i uppmätta data bestämmer den idealiska blandningsmodellens konfiguration. Avvikelserna eller likheterna med den idealiska blandningsmodellen antas vara försakade av blandning eller reaktioner. Antaganden om sammansättningen hos sprickmineral eller osäkerheter i termodynamiska konstanter påverkar inte modelleringen, eftersom modelleringen endast utgår från den uppmätta grundvattensammansättningen.

M3 använder sig av ett motsatt närmande jämfört med många andra grundvattenmodeller av standardtyp. I M3 utvärderas och beräknas blandningsprocesserna först, där de förändringar i grundvattenkemin som inte kan beskrivas med blandning förklaras med reaktio-

ner. M3 består av tre steg: det första steget är en vanlig principalkomponentanalys, följt av blandnings- och slutligen massbalansberäkningar. Den uppmätta grundvattensammansättningen kan beskrivas i termer av blandningsproportioner i % av olika vattentyper och/eller som tillskott eller förluster i mg/l av elementhalter som är associerade med reaktioner i berget.

I beräkningarna inkluderas så många variabler om möjligt. Samtliga huvudkomponenter, natrium, kalium, kalcium, magnesium, klorid, sulfat, karbonat och isotoperna syre-18, deuterium och tritium ingår som variabler i en principal komponentanalys där informationen från samtliga variabler kombineras till minsta möjliga antal linjära kombinationer. Första principalkomponenten beskriver variabiliteten i utgångsdata. Den andra principalkomponenten beskriver den rest som inte den första principalkomponenten lyckats beskriva osv. I Äspöfallet används de två första principalkomponenterna som tillsammans beskriver 72 % av variabiliteten.

Analysen av de beräknade principalkomponenterna görs genom att i ett XY plan markera värdeparet för varje observation. I detta plan identifieras extrempunkterna (dvs referensvatten och end-members). Därefter genomförs beräkningar av blandningsproportioner hos samtliga observationspunkter. Med dessa blandningsproportioner beräknas sedan en kemisk sammansättning som jämförs med den uppmätta, ämne för ämne. Skillnader betraktas som resultat av kemiska reaktioner.

M3 koden har utvecklats som en applikation av MATLAB och är nu jämförbar med andra existerande koder vad beträffar hantering.

### 9.7.3 Fortsatt utveckling

M3-konceptet kommer att appliceras på data från olika platser, t ex SFR, Oklo, Palmottu, m fl för att identifiera de väsentliga processerna och testa programmets förmåga att beskriva grundvattenkemin på en okänd plats.

M3-koden har utvecklats och applicerats på data från Äspö. Programmet behöver jämföras med andra liknande koder som t ex NETPATH. Testningen kommer att genomföras med både riktiga och syntetiska data. I fallet med syntetiska data genomförs beräkningarna så att i ett fall förekommer endast blandning, i ett annat endast reaktioner och i ett tredje både blandning och reaktioner. Resultaten av testerna kommer att styra vilka ytterligare utvecklingssteg som behövs.

VOXEL ANALYST är en kommersiell programvara som utnyttjats för hydrokemisk modellering och visualisering. Den baseras på MICROSTATION, dvs samma programvara som RVS systemet är uppbyggt på. För en fortsatt integrering av geokemiska data kommer denna programvara att användas. SKB:s GIS-databas, som innehåller alla SKB:s geologiska och geofysiska kartor, utökas med en hydrokemisk del där resultaten från olika modelleringar skall lagras i form av bilder och 3D-objekt. Hydrokemiska data från SICADA visualiserade i tvärsnitt, ytor och volymer skall lagras som 3D-objekt som kan användas direkt i RVS-systemet. Därmed får man en god spårbarhet till de data som de olika visualiseringarna baserats på. Denna databas planeras också innehålla en standard över de arbetsenheter, koordinater, bakgrundsvärden, interpolationsmetoder och färgtabeller som används vid modellering och visualisering av hydrokemiska data. Det förenklar kommunikationen mellan olika program och gör det möjligt att jämföra resultat från olika modelleringar.

## 10 Kemi

Kemiska processer är viktiga för djupförvarets barriärer. Säkerhetsanalysen behöver känna till de kemiska reaktionerna i förvarets närområde och ute i berget. Särskilt viktigt är det att avgöra hur radioaktiva ämnen kan frigöras, transporteras och fördröjas. Dessa processer har identifierats och det pågående arbetet är inriktat på att förse säkerhetsanalysen med olika typer av underlag, t ex sorptions- och diffusionskonstanter för radionuklider i berg och bentonit. Kemiska undersökningar är inte begränsade till programmet Kemi utan ingår även i angränsande program, t ex Bränsle, Buffert, Berggrund etc. En trend är att inleda allmänna studier i kemiprogrammet och sedan, om det visar sig nödvändigt, gå över till mer tillämpade undersökningar i angränsande program. Det är också vanligt att kompetens utvecklas inom Kemiprogrammet för att senare användas i angränsande program.

Resultaten som erhålls inom kemiprogrammet redovisas i rapporter, publikationer och avhandlingar. En bra informationskälla i det här avseendet är SKB:s Annual Reports. Där finns alltid årets rapportering sammanfattad och refererad. Årsrapporterna ger fler detaljer än den här redovisningen, som är medvetet kortfattad för att inte bli betungande för den som vill skaffa sig en överblick över vad som tillkommit sedan det förra FUD-programmet. Årsrapporterna är författade på engelska för att få så stor spridning som möjligt.

### 10.1 Radionuklidkemi

I förra programmet pekades plutoniums kemi ut som ett prioriterat område. Databasen för plutonium, som används för att beräkna lösligheten, behöver förbättras och åtgärder har vidtagits. Det är samtidigt ett bra exempel på en uppgift som med tiden flyttats över från Kemi till programmet Bränsle, eftersom resultaten i första hand behövs för att beskriva lakningen av utbränt bränsle.

Vätskeextraktion är en teknik som används för att studera de komplex som radionuklider bildar i lösning. Komplexkonstanternas storlek kan mätas och fördelen med den här tekniken är att man arbetar vid låga koncentrationer som är typiska för radionuklider lösta i grundvattnet (spårämneshalter, dvs  $<10^{-7}$  mol/l). Vätskeextraktionen har utvärderats och jämförts med andra metoder att mäta aktinidernas kemi. Man fann att resultaten från vätskeextraktion är väl jämförbara med vad andra metoder ger /10-1/.

En del kemiska reaktioner sker inte utan vidare, även om de är termodynamiskt möjliga. Det gäller speciellt en del redoxreaktioner. För alla redoxreaktioner gäller att ett utbyte av elektroner måste kunna ske, men ibland är detta förhindrat. Man behöver således förvissa sig om att reaktionen verkligen sker som förväntat, åtminstone om det har betydelse för säkerheten. Ett exempel på detta är reduktion av upplösta teknetium- och neptuniumjoner med tvåvärt järn i ett förvar /10-2/. Experimenten visar att sorption av reaktanterna på en mineralyta är ett viktigt steg på reaktionsvägen /10-3/. Först därefter kan redoxreaktionen ske. Reduktionen får till följd att lösligheten hos både teknetium och neptunium sjunker drastiskt. Lösligheten kan gå ner så mycket som sex storleksordningar, vilket i princip är skillnaden mellan "lösligt" och "olösligt". Nya experiment pågår för att visa att även urandioxiden, som ingår i bränslet, fungerar som reduktionsmedel.

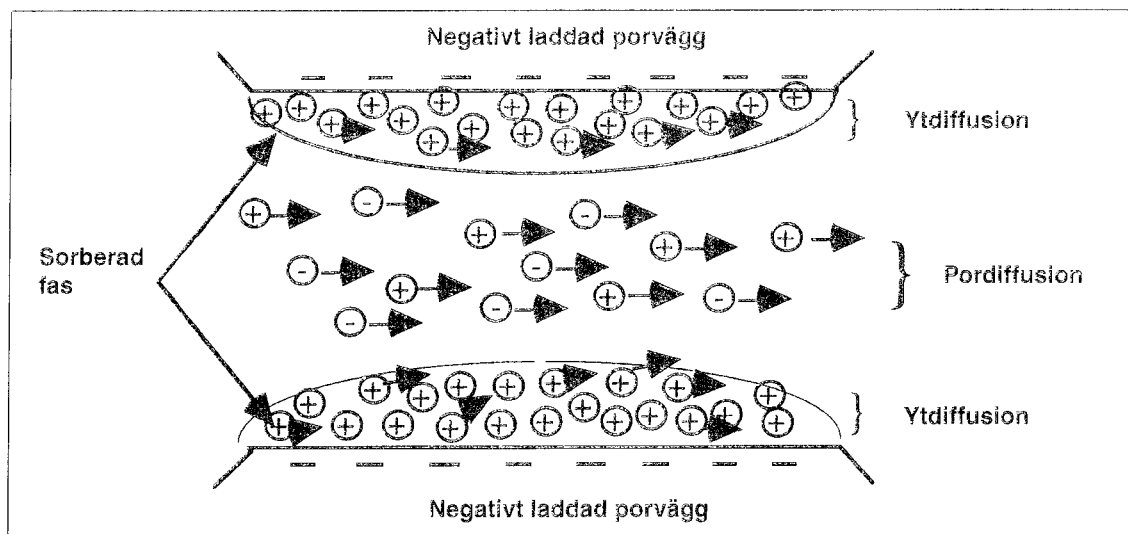
## 10.2 Sorption och diffusion

Mekanismerna för sorption av radionuklider, t ex kobolt, torium, neptunium och uran, på mineraloxider har undersökts ingående /10-4, 10-5, 10-6/. Man har kommit fram till att det är hydrolysen av metalljonerna som kontrollerar sorptionen och bestämmer hur stark den blir. Det är i och för sig ingen överraskning. Redan de tidiga  $K_d$ -mätningarna (av Bert Allard och medarbetare) med aktinider visade på ett starkt samband med hydrolys, men nu är således mekanismen för detta klarlagd. Komplexbildare kan minska hydrolysens betydelse, vilket betyder att i grundvattnet så kan t ex karbonatjoner inverka på förloppet. För att beskriva sorptionen används ytkomplexeringsmodellen. Sorptionen av Co, Th, Np och U påverkas inte av jonstyrka (salthalt), vilket visar att de bildar sk innersfärskomplex. Typiska undantag är Cs och Sr som är känsliga för jonstyrka och i stället bildar ytersfärskomplex. Ytkomplexeringsmodellen är värdefull som en metod att demonstrera vår förståelse av sorptionsmekanismerna och den kan också användas för att spåra osäkerheter, men det är inte praktiskt genomförbart att ersätta användningen av  $K_d$ -värden i säkerhetsanalysen med ytkomplexkonstanter, åtminstone inte ännu.

Matrisdiffusion, dvs diffusion av radionuklider in i bergets sammanhängande system av vattenfyllda mikrosprickor, är den viktigaste retentionsmekanismen för berget. I själva verket är sorptionen av radionuklider på mineralytorna i mikrosprickorna mycket viktigare för den beräknade retentionen än sorptionen på ytorna i de öppna sprickorna där grundvattnet transporteras. Det är således egenskaperna hos berget nära de vattenförande sprickorna som är betydelsefulla. Viktiga egenskaper för retentionen av radionuklider är diffusivitet  $D_e$ , porositet  $\epsilon$  (diffusionsporositet) och sorption i bergmatrisen,  $K_d$ . Andra viktiga parametrar i det här sammanhanget är "flödesvätt yta" och "inträngningsdjup" för diffusionen. Med tiden så har det samlats en ansevärd mängd information om matrisdiffusionen och därtill hörande fenomen. Tillgängliga data borde ge ett mycket bra underlag för säkerhetsanalysens beräkningar, men det är inte alltid så lätt att få fram tillräckligt med information om enskilda experiment, vilket är nödvändigt för att resultaten skall kunna användas. En sammanställning av litteraturdata om matrisdiffusion har emellertid gjorts som ett första steg till en ny databas för kommande säkerhetsanalyser. Inte enbart experiment utan också resultat från studier av naturliga analogier inkluderades i sammanställningen /10-7/. Litteratursammanställningen har legat som grund för valet av konstanter till SR 97 (se nedan).

Diffusion av cesium, strontium och jodid i kompakterad bentonit har uppmätts /10-8/. Det har gjorts tidigare, men vi beslöt att upprepa mätningarna med större omsorg, eftersom de är såpass viktiga för säkerhetsanalysen. Man finner att diffusionen av I hindras av de negativt laddade lermineralpartiklarna, s k anjonexklusion. Diffusionen av  $Cs^+$  och  $Sr^{2+}$  underlättas däremot, eftersom de är rörliga i det koncentrerade lagret av katjoner på de negativt laddade ytorna, se Figur 10-1. Det senare fenomenet kallas ytdiffusion och uppträder även i samband med matrisdiffusionen, dvs då radionuklider diffunderar in i bergets mikrosprickor.

Till sist så har konstanterna, som behövs för att beräkna sorption och diffusion av radionuklider i granitiskt berg och bentonitlera, sammanfattats och rapporterats inför säkerhetsanalysen SR 97 /10-9, 10-10, 10-11/.



*Figur 10-1. Schematisk beskrivning av jondiffusion i ett porutrymme mellan negativt laddade mineralytor. Anjonerna är begränsade till en mindre porvolym på grund av elektrostatisk repulsion, medan katjonerna koncentreras i den sorberade men mobila fasen. (Illustration enligt Neretnieks och Ohlsson, Kemiteknik, KTH).*

### 10.3 Kolloider

Koncentrationen av naturliga kolloider i djupa grundvatten är mycket begränsad. Noggranna analyser ger kolloidhalter på omkring 0,05 mg/l /10-12/. Det är mycket lågt, tillräckligt lågt för att sakna betydelse. Utöver de naturliga kolloiderna måste man emellertid fråga sig, om inte material i förvaret på något sätt kan bidra genom att alstra egna kolloider. Till exempel bentonit kan i princip frigöra kolloider i form av lerpartiklar. Även detta har diskuterats och en viktig förutsättning för att bentonitgelen skall förbli stabil är att koncentrationen av katjoner i grundvattnet, speciellt tvåvärda katjoner, inte blir för låg /10-12/. Djupt grundvatten är mineralrikt, så det här villkoret är väl uppfyllt (konc.  $Ca^{2+} > 0,1$  mmol/l).

En störning som verkligen ger upphov till kolloider i reducerande grundvatten är tillförsel av luftsyre. Efter förslutningen kan man således få förhöjda halter av kolloider i förvaret, åtminstone tills allt syre förbrukats.

En annan typ av kolloidal transport som har diskuterats är att gasbubblor från t ex järnkorrosion skulle kunna bära kontaminerade lerpartiklar från förvaret. För att utröna betydelsen av ett sådant scenario så genomfördes en beräkning av radionuklidtransport med gas och partiklar. Resultatet av beräkningarna visade att utsläppen blev mycket obetydliga även för mycket konservativa antaganden om "bubbeltransport" /10-13/.

### 10.4 Organiska ämnen

Att analysera lågmolekylära organiska komponenter, som finns i grundvattnet utöver humus- och fulvosyror, har visat sig besvärligt. Å andra sidan finns det inget som tyder på att sådana ämnen skulle vara av betydelse utom möjligen som tänkbar näringskälla för bakterier. När det gäller komplexbildning så är det alltså humus- och fulvosyror som är föremål för intresse. Det är väsentligt att halterna av humusämnen alltid är låga i ett förvar.

Organiska ämnen kan också tillföras utifrån i samband med bygge och drift av förvaret. I ett förvar för högaktivt avfall kommer man i möjligaste mån att begränsa den tillförseln, men för låg- och medelaktivt avfall får man räkna med att avfallet i sig innehåller en hel del organiskt material. Detta behandlas utförligare i kapitel 12 "Annat långlivat avfall".

## 10.5 Mikrober

I samband med föregående FUD-rapport gjordes en genomgång av de viktigaste områdena för mikrostudier med inriktning på avfallens långsiktiga säkerhet /10-14/. Med ledning av slutsatserna i den rapporten så har undersökningarna fortsatt och de nya resultaten har sammanställts i tekniska rapporter eller publicerats i vetenskapliga tidskrifter. Mikrostudier har varit ett prioriterat område. Undersökningarna har varit knutna till Äspö-laboratoriet och URL i Kanada /10-15/, samt till analogistudierna i Oklo, Gabon /10-16/ och i Maqarin, Jordanien. Många av de mikrobiella undersökningar, som gjordes först i Stripa och sedan i Äspö har redovisats utförligt /10-17/. Det har även gjorts laboratorieförsök, t ex för att se om sulfatreducerande bakterier kan överleva i en bentonitbuffert /10-18/. En ny sammanfattande rapport har getts ut för perioden 1995 till 1997 /10-19/. Rapporten förklarar och analyserar uppnådda resultat i den perioden. Den vetenskapliga basen utgörs av 11 separata artiklar som publiceras i vetenskapliga tidskrifter och finns bifogade till rapporten. Bland de slutsatser som dras kan följande exempel anföras:

- Det finns mikroorganismer som lever på stora djup i granitiskt berg.
- Mikroorganismer som använder vätgas som energikälla och koldioxid som näringsskälla (kol) har återfunnits i djupa granitiska grundvatten.
- De viktigaste gaserna i grundvattnet är helium, kväve, metan och koldioxid. Alla kan produceras eller konsumeras av bakterier utom helium.
- Uppnådda resultat visar tydligt att syre konsumeras av bakterier i ett slutet förvar.
- Sulfid kan produceras av bakterier under förvarsförhållanden genom reduktion av sulfat.
- Bentonitbufferten som omger kopparkapslarna utgör en livsfientlig miljö för mikrober på grund av kombinationen strålning, värme och låg tillgänglighet av vatten (dvs låg kemisk aktivitet hos porvatten i högkompakterad bentonit).
- Mikroorganismer kan rekombinera produkterna som bildas genom radiolys av vatten.
- Transport av radionuklider med bakterier är i princip möjligt, men halterna av bakterier i djupa grundvatten är för låga för att detta skall vara av betydelse.
- Mikroorganismer som kan producera komplexbildare behöver undersökas ytterligare.
- Det förefaller som om det hyperalkaliska grundvattnet i Maqarin och därmed även porvatten i betong är en för extrem miljö för bakterier. Man har visserligen hittat bakterier i Maqarins vatten men de är inte aktiva och inte alkalofila, dvs de hör inte hemma där.

De väsentligaste punkterna är de som berör sulfatreducerande bakterier och deras överlevnad i förvaret. Eftersom detta har betydelse för kopparkapseln, så ägnas detta speciell

uppmärksamhet och ingår som en del av de studier som bedrivs inom projektet Inkapsling.

## 10.6 Valideringsexperiment

Betong används för att stabilisera och förpacka låg- och medelaktivt avfall. Det används också till att bygga förvar för sådant avfall (t ex SFR). Betong är överhuvudtaget ett mycket användbart material för byggande under jord, t ex till golvbeläggning, sprutbetong på väggar och tak, injektering av bergsprickor, konstruktioner av olika slag, etc. Ett framtida förvar för utbränt bränsle ställer inga oavvisliga krav på betonganvändning, men det kan vara fördelaktigt att ha den möjligheten. Därför undersöker vi vad det innebär att ha betong i alla typer av förvar. Anläggningscement av Portlandtyp innehåller alkalihydroxider och portlandit som ger ett högt pH åt betongens porvatten. För att pröva hur detta påverkar berget och grundvattnet i ett förvar så genomförs laboratorieförsök där simulerat cementporvatten får rinna genom kolonner fyllda med krossade mineral. Målsättningen är att validera de modeller som används för att förutsäga den alkaliska vittringen och andra förändringar. Experimenten utförs av BGS (British Geological Survey) i Storbritannien och stöds gemensamt av Nagra, Nirex och SKB. Arbetet har pågått sedan 1993, en första fas har avrapporterats, men det är ännu inte avslutat.

Ytterligare valideringsexperiment som pågår, men ännu inte rapporterats, är; 1) radionuklidmigration i överborrade bergsprickor; 2) simulering av närområdestransport från buffert till berg och; 3) transport av kolloider i en lerbuffert.

## 10.7 Miljöfarliga ämnen

SKB:s forskning för säkerhetsanalysen är i allt väsentligt inriktad på avfallets radiologiska giftighet. En liten del av de ämnen som ingår i avfallet kan emellertid klassas som miljöfarligt avfall. Det gäller främst metaller som t ex bly, kadmium och beryllium. Miljöfarliga ämnen inventeras och säkerheten för de här ämnena i ett förvar prövas. Ett djupförvar skyddar även för icke radioaktiva ämnen; se t ex Naturvårdsverkets rapport om slutförvaring av kvicksilver /10-20/. Långlivat låg- och medelaktivt avfall innehåller en del miljöfarliga metaller och detta beaktas i analysen av den långsiktiga säkerheten (kapitel 12).

## 10.8 Mål och program

Kemiprogrammet har följande mål för de närmaste tre åren (och längre):

- Bestämma de viktigaste radionuklidernas (redox)reaktioner i förvaret.
- Förbättra underlaget för sorption och diffusion i berg och återfyllnad.
- Utredda betydelsen av kolloider och mikrober för förvarets långsiktiga säkerhet.
- Starta nya och slutföra gamla valideringsexperiment.

Det pågår experiment som syftar till att utreda hur uran(IV) i förvaret påverkar andra aktinider. Vi hoppas att det skall vara möjligt att dra slutsatser av detta om några år. Dessutom ägnas en del tid åt att undersöka radionuklidernas komplex med fosfat och sulfat i avsikt att komplettera vår kunskap på det området.

Kolloider i grundvattnet, liksom humusämnen betraktas knappast som något problem längre. Därmed inte sagt att detta kan lämnas helt utan avseende. På en framtida plats räknar vi med att behöva göra analyser av sådana komponenter, för att försäkra oss om att förhållandena är som väntat i det avseendet. 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.

Mikrober i djupa grundvatten kommer att undersökas ytterligare. Det är framförallt de mikrobiella processerna som intresserar oss, i den mån de kan ha betydelse för ett djupförvar. Äspölaboratoriet spelar även fortsättningsvis en stor roll och in-situ försök med mikrober planeras. Om det går att genomföra, så skall vi välja ut en plats djupt nere i Äspöanläggningen och reservera den för dessa försök.

Teknik utvecklas för att lättare och snabbare kunna genomföra mätningar av matrisdiffusion. Vi förutser att sådana mätningar kommer att behöva utföras på prov från en framtida förvarsplats. De avancerade modellerna för ytsorption av radionuklider på mineral kommer att prövas ytterligare. Målet är inte primärt att ersätta användningen av sorptionskoefficienter ( $K_d$ -värden) utan att förstå mekanismerna för sorption.

Laboratorieförsöken med betongporvatten och bergmineral, som utförs av BGS (British Geological Survey), skall enligt planerna snart vara avslutade och avrapporterade. En tänkbar uppföljare till detta är in-situ försök. Sådana planeras och diskussioner pågår med Nagra om internationellt samarbete i underjordslaboratoriet i Grimsel. Även andra organisationer har anmält intresse. Kompletterande försök skulle kunna utföras i Äspö.

## 10.9 Kompetensutveckling

Mycket av undersökningarna för kemiprogrammet utförs av forskare på universitet och högskolor. Kärnkemi, naturliga vatten och mikrobiologi är prioriterade områden. Uppgifterna är fortfarande av intresse för den grundläggande forskningen. Det ser man inte minst genom att arbetet ofta ingår som del i avhandlingar av olika slag. Vi anser att detta ger undersökningarna en hög kvalitet och att vi härigenom upprätthåller hög kompetens för såväl pågående som kommande utredningar. I ett längre perspektiv behöver man komplettera med en mer produktionsinriktad verksamhet, t ex för att utföra ett stort antal analyser i samband med en platsundersökning.



# 11 Biosfären

För att kunna bedöma de radiologiska konsekvenserna av eventuella radioaktiva utsläpp från ett slutförvar, behöver transporten från berget till människan och till andra organismer beskrivas. Det övergripande målet för SKB:s studier av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra trovärdiga konsekvensberäkningar i säkerhetsanalyserna. Biosfärstudierna skall:

- beskriva händelser och processer på ett realistiskt sätt med en motivering till varför vissa processer är betydelsefulla och likaså en utförlig motivering varför andra processer har uteslutits,
- ge en mätsticka för att kunna jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller lokaliseringar,
- visa att myndigheternas krav på säkerhet och gränsvärden är uppfyllda.

För modellering som syftar till att visa att dosgränser inte överskrids kan det vara acceptabelt att redovisade konsekvenser är starkt överskattade. Men vid konstruktion av ett djupförvar kan dessa överskattningar av effekterna medföra onödiga åtgärder eller felaktiga prioriteringar. Dessutom krävs en grundlig kunskap om biosfären för att kunna motivera de förenklingar som genomförs i dosuppskattningar vid optimering. Eftersom processerna som pågår i biosfären är tydliga för en stor grupp experter ur andra discipliner och ickespecialister, krävs det tydliga logiska förenklingar som fortfarande beskriver biosfären på ett vetenskapligt intuitivt sätt.

Biosfären karaktäriseras av en stor variation och uppfattas som komplex och oförutsägbar. Den största osäkerheten vid dosberäkningar i dagens modeller är beroende av biosfären. Den största delen av osäkerheterna beror på bristfälliga konceptuella beskrivningar av ekologiska processer, till skillnad från de oftast bättre beskrivna fysikaliska och kemiska processer i biosfären. En annan del av osäkerheten förorsakas av bristen och kvaliteten på data. Tidigare har, nästan uteslutande, generiska data använts. Motivet för detta har varit de stora förändringar som sker i biosfären inom relativt korta tidsperioder. För tider efter det att nästa Skandinaviska istid börjat är detta riktigt. Men för de närmaste 1000 åren kan dock platsspecifika databaser och specifika bedömningar ge underlag för en någorlunda meningsfull prognos. Utgångspunkten för dosberäkningarna är dagens förhållanden som då måste beskrivas tillräckligt väl för att kunna göra realistiska beräkningar.

Det övergripande målet med biosfärsprogrammet är att kunna reducera osäkerheterna och med aktuell vetenskaplig kunskapsbas kunna beskriva de ur radiologisk synpunkt viktigaste processerna i biosfären.

## 11.1 Förståelse och konceptuella modeller

SKB:s modelleringar av radionuklidspridning i biosfären har genomförts med BIOPATH, ett beräkningsprogram som utvecklats av Studsvik EcoSafe och som ingått i det internationella BIOMOVs-arbetet. BIOPATH har utnyttjats både för KBS-3, SFR och

SKB 91 och har successivt vidareutvecklats med bland annat insatser från SKB vilket sammanfattas i en genomgång av Edlund, 1998 /11-1/. Modellstudierna utmärkte sig vid starten under 70-talet av ett helhetstänkande vilket då var banbrytande inom miljöområdet. Modellernas baserades på utsläpp runt kärnkraftverk vilket senare anpassades till ett tänkt djupförvar. Men fortfarande antogs att utsläppet sker direkt i recipienten som ett årligt enhetsutsläpp. Denna ansats motiverades med att det ansågs vara ett konservativt antagande att bortse ifrån transporten och processerna mellan geosfären och en yttlig recipient. Modellkonceptet har i stort sett övertagits i de flesta modeller som hanterar radionuklid-spridning i biosfären /11-2–11-5/. För säkerhetsanalysen kan dessa förenklingar vara motiverade, men för förståelsen och motiveringen av förenklingarna är de otillräckliga. I vissa fall kan de dessutom underkatta doserna /11-6/. En noggrann validering av underlaget är dessutom svår när det saknas alternativa modeller och synsätt /11-7/. Alltmer tillkommer aspekterna att konsekvenserna för omgivande fauna och flora skall belysas vid en säkerhetsanalys /11-8/. Detta kräver modeller som baseras på radionuklidflödet i hela ekosystemet och inte enbart för specifika vägar som är kritiska för människan (t ex brunn eller komjolk).

De senaste åren har en utveckling skett av biosfärmodeller för miljöföroreningar (t ex /11-9, 11-10/) baserade på systemekologiska principer. Dessa modeller har oftast angripit problem som gäller upplagring och effekter på miljön till skillnad mot radioekologiska modeller som främst har syftat till att förutsäga doser till människan. Dessa modeller har också varit inriktade på att beskriva och använda generiska processer, där de radioekologiska modellerna ofta använder sammansatta modellparametrar. För att kunna beskriva och få trovärdighet av arbetet inom biosfären är det viktigt att de konceptuella modeller som används motsvarar den allmänna vetenskapliga uppfattningen inom ekologi, ekotoxikologi och miljövärd förutom radioekologi. Därför kommer erfarenheter och utvecklingen inom dessa områden bevakas för att kunna överföra nya modellkoncept till de radioekologiska modellerna i det kommande forskningsprogrammet.

## 11.2 Modellutveckling

Nuvarande säkerhetsanalys har knutits till platsspecifika förhållanden, vilket innebär att BIOPATH-modellens uppbyggnad anpassats till lokala förhållanden. I säkerhetsanalysen har det antagits att nuklider från djupförvar kan föras direkt till recipienterna i en årlig mängd som räknats fram ur spridningsberäkningarna för fjärrzonen. Då dessa spridningsberäkningar baseras på strömrör som mynnar ca 20–40 m under markytan har det varit möjligt att koppla dessa utflödespunkter till ovanliggande biosfär av olika karaktär. För modelleringen har detta medfört att biosfären har indelats i olika klasser i ett modulsystem /11-6, 11-11/.

Modeller har tagits fram för att beräkna omsättningen och exponering från utsläpp av radionuklider till sjöar, rinnande vattendrag, kustområden, myrmarker och jordbruksområden /11-6/. Dessutom har beräkningar utförts för användande av kontaminerat grundvatten (brunn). Exponeringen till människa har sedan beräknats för de tre platsspecifika områdena i SR97 /11-12/.

Den högre upplösningen i olika moduler kräver ett bättre dataunderlag och en noggrannare beskrivning av processer. Detta uppmärksammar brister i underlaget och modeller, t ex brister i beskrivning av transporter från fjärrzon till biosfär samt avsaknaden av en skogsmodell, vilka beskrivs nedan och i processrapporten /11-13/. Modellen för SR97 baserades på tillgänglig kartinformation /11-12/. En jämförelse gjordes sedan med en litteraturgenomgång av tillgängliga platsspecifika data om biosfären i dessa områden /11-14/, hydrologi och lösa avlagringar /11-15/. Inför kommande platsundersökningar

krävs en utvärdering hur platsspecifika data måste vara och en avvägning vad olika förbättringar av mätmetoder och beräkningar ger jämfört med osäkerheterna som finns gentemot modellerna. Dessutom måste en noggrann plan upprättas så platsspecifika data kan säkras ostörda innan andra ingrepp försvårar tolkningen.

### 11.3 Transportprocesser

Transportprocesser avgör vilka ekosystem och organismer som kommer att utsättas för radionuklider samt hur stor utspädningen blir. Stora delar av detta hanteras i nuvarande modeller under förutsättningen att radionukliderna är lösta i vatten. En revidering har gjorts av omsättningstiden av det kustnära vattnet runt Äspö /11-16/ med hjälp av nya modeller för kustnära vattenomsättning. Ett försök till en modellering av den ytära hydrologin har gjorts /11-15/ men det krävs vidareutveckling för att kunna beskriva vilka delar av biosfären som kan utsättas för radionuklidläckage. En stor andel av radionuklider i miljön kommer dock vara bunden till partiklar, humuskomplex och organismer. Därför är transporten av radionuklider i biosfären i större utsträckning beroende av partikeltransporten som inte har berörts i någon större utsträckning i tidigare studier. Vidare exempel på viktiga transportprocesser beskrivs i processrapporten /11-13/. I det kommande forskningsprogrammet kommer storleken och den relativa betydelsen av dessa processer att utvärderas.

### 11.4 Skogsekosystemet

Skogen är den dominerande recipienten för de flesta tilltänkta lokaliseringar /11-14/. Skogen har varit i fokus för flera projekt som studerat nedfallet från Tjernobyl, se översikt i /11-17/. De flesta arbeten har sett de kortsiktiga konsekvenserna av radionuklidtransporten och källan har varit nedfall från luften. Men hittills har få beräkningar gjorts av spridning och ackumulation av nuklider från ett djupförvar i detta ekosystem. Det viktigaste långsiktiga processerna är troligen ackumulation av nuklider i jordprofilen och biologiska urlakningsprocesser som förflyttar nuklider till biota. De lysimeterförsök som gjorts i BIO-MOVS II /11-18/ tyder på att de biologiska processerna i marken är den viktigaste transportmekanismen från grundvatten till markens toppskikt. I det kommande forskningsprogrammet kommer processerna att utvärderas och en modell för skogsekosystemet att utvecklas.

### 11.5 Sediment

Sedimenten i hav, floder och sjöar utgör potentiellt viktiga områden som påverkar transporten av radionuklider till biota. I många potentiella utströmningsområden kommer radionukliderna att passera ett sedimentlager. Sedimentets genomsläpplighet och adsorptionen påverkar spridning och spädningsmönstret /11-19, 11-20, 11-21/. I gränsskiktet mellan sediment och vatten sker en markant förändring i redoxförhållanden, salthalt och biologisk aktivitet /11-22, 11-23/ som kan påverka radionuklidflödet kraftigt. Dessa processer har inte beaktats vid beräkningarna av radionuklidtransporten från geosfären till biosfären. I första hand kommer radionuklidflödet att begränsas, men ackumulationen av radionuklider kan pågå tusentals år innan de frisätts genom t ex resuspension vid landhöjning, vilket kan resultera i doser som är tusentals gånger högre. Därför är det viktigt att utvärdera sedimentlagrens stabilitet och retentionsförmåga.

## 11.6 Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt

Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Dessa faktorer är också viktiga randvillkor för transportmodellerna i geosfären. Landhöjningen påverkar vilken biotop som är dominerande i ett område. Vattenomsättning, grundvattenbildning och ytavrinning är en av de viktigast fysikaliska faktorer som påverkar dosen. Dessa faktorer är mycket variabla och stokastiska, men variationsvidden kan studeras med modeller av dagens förhållanden och en rekonstruktion av förhållanden sedan senaste istiden.

Påse /11-24/, har beskrivit hur strandlinjen har förskjutits sedan istiden och gjort en prognos för de närmaste 10000 åren under förutsättning att havsytans nivå är konstant. Den närmaste 100 åren kan havsytans nivå stiga på grund av växthuseffekten ca 0,4 m /11-25/. Men på längre sikt kommer en eventuell framtida glaciation återigen binda vatten i glaciärer vilket ger en sänkning av havsnivån ca 100 m /11-26, 11-27/. Detta påverkar utströmningsområden vid kusten vilket i sin tur återverkar på miljön runt djupförvaret. Det påverkar också salthalten i Östersjön samt biosfärens sammansättning. Salthalten påverkar vilka ekosystem som kommer att dominera i Östersjön och vilka egenskaper radionukliderna har. En sammanställning av kunskaperna om salthalten i Östersjön sedan senaste istiden har gjorts men framtida salthalt är svår att bedöma /11-28/. Salthalten bestäms av hur lätt saltvattenvattnet kan tränga in i Östersjön samt den totala avrinningen i Östersjöbäckenet /11-29/. Havsytensänkningen minskar inströmningen alternativt helt isolerar Östersjön från Nordsjön vilket betyder en utsötning. När en glaciation påbörjar så kommer vatten att bindas till isen vilket betyder att avrinningen till Östersjön minskar. Det innebär att utspädningen av saltvattnet minskar, dvs Östersjön kan bli saltare. Stigebrandt /11-29/, har visat att salthalten skulle påverkas kraftig (öka 4 promilleenheter) vid en 30 % reducering av sötvattentillflödet. Först när den oceanografiska modellen kopplas med en avrinningsmodell och till landhöjningen kan en bättre beskrivning erhållas av rimliga framtida förhållanden i Östersjön.

Klimatet påverkar också grundvattenbildningen och vattenomsättningen i sjöar och vattendrag, vilket är viktiga faktorer för flöden på förvarsnivå men också vilken biosfär som kan förväntas. En uppskattning av tänkbara variationer av grundvattenbildningen i Äspöområdet har gjorts av SMHI /11-30/. Dessa resultat kan sedan kopplas till den klimatutveckling som skett under holocen (se litteraturgenomgång /11-31/) för att rekonstruera grundvattenbildningen och förutsäga vilken framtida utveckling den kan få (t ex /11-32, 11-33/).

## 11.7 Internationellt arbete

Det internationella projektet BIOMOVSII avslutades 1996 och producerade flera rapporter där SKB har deltagit aktivt i arbetet. De främsta målen med projektet var att testa noggrannheten av förutsägelserna av biosfärsmodeller för vissa valda scenarier och nuklider, att förklara skillnader i modellförutsägelser på grund av skillnader i modellstruktur och indata samt rekommendera framtida studier för förbättringar /11-3-11-5, 11-18, 11-34, 11-35/. Rapporterna visade betydelsen av osäkerheter, modellutvärdering och vikten av korrekta konceptuella modeller. Detta illustrerades av jämförelser mellan modeller och experimentella data /11-18/. Det framkom att de största bristerna är avsaknaden av en korrekt processbeskrivning. De processer som normalt inte hanteras är de biologiska och ekologiska (rottransport, bioturbation) medan fysiska och kemiska processer (t ex adsorption) i många fall är bättre beskrivna. SKB deltar och bevakar det fortsatta arbetet som fortsätter nu med BIOMASS i IAEA:s regi.

Arbetet inom BIOMOVs och BIOMASS har uppnått framgångar när det gäller att uppnå en samsyn i många frågor och praktiska problem, men basen för diskussionerna är ändå en liten grupp med få kontakter till omvärldens kunskaper om andra miljöhot. För att vitalisera arbetet krävs att den moderna kunskaperna inom systemekologi och ekotoxikologi appliceras på radionuklidöverföring i biosfären. Därför är det viktigt att verka för spridning av kunskaper från dessa program till andra men också att få in denna kompetens i BIOMASS.

## 11.8 Måluppfyllelse av FUD 95

I biosfärsprogrammet i FUD 95 sattes följande delmål som uppfyllts helt eller delvis:

Kvantifiering av de osäkerheter som beror på att biosfären hela tiden förändras har skett i flera rapporter /11-14, 11-21, 11-36, 11-37/ men kommer att fortsätta i kommande program.

En utvärdering platsspecifika av kandidatplatsernas potential och begränsningar för förändringar i biosfären har påbörjats i /11-12, 11-14, 11-15, 11-38/ men kräver fortsatta studier

Ett förbättrat dataunderlag för spridningsmodeller har tagits fram /11-18, 11-19, 11-39/.

Modeller har validerats genom studier av analoga spridningsprocesser /11-18, 11-19, 11-39/, men kommer alltid att vara aktuellt när nya modeller utvecklas.

## 11.9 Mål och program för det fortsatta arbetet

Det övergripande målet för biosfärsstudierna är att kvantifiera spridningen av radionuklider och andra ämnen från avfallens slutförvar till människans omgivning, samt de konsekvenser detta medför. Främst sker det som underlag till säkerhetsanalyser av framtida djupförvar.

- Utveckla metodik för att hantera riskbedömning för biota, bland annat hur dos till djur och växter beskrivs och värderas.
- Beskriva förlopp i gränsytan mellan biosfär och geosfär.
- Utvärdera rollen av ekosystemens struktur och funktion för överföring av element från geosfären och fördelningen i biota.
- Analysera betydelsen av transport i biota, partiklar respektive vatten i biosfären.
- Identifiera viktiga skillnader vid analys av ett något annorlunda klimat.
- Identifiera effekter av landhöjning på omsättning av element som lagrats i sediment och hur grundvattnets salthalt och kemiska förhållanden påverkas.
- Utvärdera vilka parametrar som kan beskrivas med generiska data respektive platsspecifika data.
- Underhålla och modernisera biosfärens modellverktyg.
- Utveckla och upprätthålla kompetensen inom biosfärsmodellering.

- Medverka i det internationella arbetet med biosfärmodeller.
- Bevaka forskningen som pågår inom strålskydd och stråleffekter.
- Analysera och utvärdera alternativa säkerhetsindikatorer.

### 11.9.1 Processorienterade konceptuella modeller

En naturlig fortsättning av det arbete som redovisas i processbeskrivningen /11-13/ är att använda processorienterade modeller. Ett systemekologisk angreppssätt tar hänsyn till processer och reservoarer i ekosystemen och kan därmed reducera den stora spridningen i överföringskonstanter för att slippa alltför konservativa antaganden i säkerhetsbedömningen. Eftersom metodiken baseras på massbalanser innefattar även den enklaste modellen hela radionuklidflödet. En mera detaljerad modell kan belysa kvantitativt viktiga eller kritiska processer. Resultatet är en generell modell som är flexibel för att kunna lösa nya frågeställningar. Syftet är att kunna bedöma var ämnen kommer att ackumuleras och vilka ekosystemtyper och organismer som är känsligast, samt vilka konsekvenser det har för människan. Denna insats är långsiktig och har stor betydelse som ett generellt verktyg.

De flesta av biosfärsprogrammets studier (t ex skogecosystemet, transporter, sediment) kommer att grunda på dessa principer. Specifikt inom detta delmoment kommer ett ramverk byggas upp genom:

- En fördjupad processbeskrivning.
- En översikt av befintliga ekosystemmodeller av radionuklider, alternativt analoga ämnens anrikning och spridning.
- En simulering av hur olika relevanta typekosystems komplexitet och produktivitet inverkar på var och hur mycket olika ämnen ackumuleras i biota.
- Inventering av vilka databaser som kan användas utanför radioekologin.
- Alternativa indikatorer för påverkan på biosfären eller funktion av förvaret.

### 11.9.2 Transportprocesser

Transportprocesser avgör vilka ekosystem och organismer som kommer att utsättas för radionuklider samt hur stor utspädningen blir. Den största andelen 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. Detta betyder att t ex en utspädning i vatten är en underskattning av de doser som kan erhållas. Projekt syftar till utvärdera förhållandet mellan partikeltransport och vattentransport i akvatisk system och transport av partiklar och organismer i den terrestra miljön.

- Litteratur och modellstudier av partikeltransport kontra vattentransport.
- Översyn av cirkulationen i kustområdena med nya kustnära oceanografiska modeller.
- Yttnära hydrologiska modeller för att kvantifiera horisontaltransporten och utströmningsområden i biosfären.

- Betydelsen av migrationer av organismer för utspädningen av radionuklidinnehåll i födan.
- Experimentellt arbete rörande transport, ackumulation och upptagsmekanismer genom den ekologiska näringskedjan i akvatiska miljöer.
- Resuspension av sediment (se sediment).
- Transporten av matvaror och dess betydelse för utspädning av radionuklider.
- Fastställa minsta möjliga transportbehov för en självförsörjande population.

### 11.9.3 Skogsekosystem

Skogen är den dominerande recipienten för de flesta tilltänkta lokaliseringar, men hittills har få beräkningar gjorts av spridning och ackumulation av nuklider från ett djupförvar i detta ekosystem. Arbetet kommer att baseras på litteraturstudier och modeller. Det skall kartlägga viktiga mekanismer och processer i skogsekosystemet. Denna kunskap omsätts sedan till relevanta modeller som beskriver och beräknar doser för utflöden till skogen. Viktiga frågor som identifierats hittills är:

- Ackumulationsprocesser i jordprofilen.
- Rottransport.
- Anrikning och vittringsprocesser i jordarter orsakade av mycelbildning.
- Kolloidtransport.
- Effekter av långsiktigt skogsbruk t ex hyggesbränning, markskador.
- Grundvattenfluktuationer.
- Utströmningsområden (se transporter).

### 11.9.4 Sediment

I gränsskiktet mellan sediment och vatten sker markant förändring i redoxförhållanden, salthalt och biologisk aktivitet som kan påverka radionuklidflödet kraftigt. Dessa processer har inte beaktats vid beräkningarna av radionuklid transporten från geosfären till biosfären. Kortsiktigt kommer dessa processer troligen minska utflödet och ge lägre doser, men långsiktigt kan stora mängder radionuklider ackumuleras som frisätts vid landhöjning, resuspension o d vilket kan ge höga doser. Dessutom exponeras organismerna som lever i sediment för höga halter som kan föras vidare i näringskedjorna t ex till fisk. Arbetet kommer att baseras på litteratur och modell studier man kan också kräva kompletterande fältarbete och experimentell arbete.

- Utströmningsområden kommer att karteras och beskrivas.
- Processer som påverkar spridning och transport i lösa jordlagren kommer att studeras.
- Omlagringprocesser vid landhöjningen.
- Biologiska upptagsmekanismer.

- Kemiska och fysikaliska processer i gränsskiktet.
- Återkopplingar till geosfären och geokemin.

### 11.9.5 Långtidsvariationer i klimat, landhöjning och salthalt

Förutsättningarna för biosfären styrs i stor utsträckning av klimatet och fördelningen mellan land och vatten. Vattenomsättning, grundvattenbildning och ytavrinning är en av de viktigast fysikaliska faktorer som påverkar dosen. Landhöjningen påverkar vilken biotop som är dominerande i ett område. Salthalten påverkar vilka ekosystem som kommer att dominera i Östersjön och vilka egenskaper radionukliderna har. Dessa faktor är också viktiga randvillkor för transportmodellerna i geosfären. Projektområdet avser att belysa olika förhållanden i Sverige fram till nästa istid. Utgångspunkten kommer att vara en rekonstruktion av händelser sedan senaste istiden samt processer som pågår i andra klimatzoner. Arbetet kommer att baseras på litteraturstudier och modellering. Några viktiga delmoment är:

- Grundvattenbildning och dess känslighet för klimatförändringar.
- Avrinningen i forntid och framtid.
- Salthaltsförändringar i Östersjön beroende på landhöjning och klimatförändringar.
- Permafrost och tundrans betydelse för radionuklidtransport i biosfären.

### 11.9.6 Modellutveckling

Modellverktygen BIOPATH och PRISM behöver ett fortlöpande underhåll och utveckling då nya insikter om processer implementeras. Dessutom genomförs en sensitivitetsanalys för att testa om de nya processerna påverkar slutresultatet nämnvärt eller om osäkerheten i parameterna påverkar resultatet. Viktigt är att testa modellernas känslighet för variationen i platsspecifika parameter. Resultatet utmynnar i detaljerad plan vilka variabler som måste säkerställas i platsspecifika undersökningar och vilka som hämtas eller beräknas ur existerande källor.

- Sensitivitetsanalys av befintliga modeller.
- Utvärdering av mät noggrannhet av parametrar.
- Modellutveckling och underhåll.

### 11.9.7 Internationellt arbete

I det internationella arbetet inom bland annat IAEA, EU, NKS diskuteras standarder, metodik och lagstiftning vilken är viktigt att följa och aktivt komma med förslag till. Likaså presenteras nya rön inom strålningsbiologi, miljövard och systemekologisk forskning som är av betydelse för biosfärsarbetet. Följande aktiviteter anses som viktiga:

- Aktivt deltagande i BIOMASS.
- Följa arbetet inom EU, NKS.
- Följa och presentera arbeten vid viktiga möten om strålningsbiologi, miljövard och systemekologi.



- Följa arbetet vid SKI, SSI och bevaka lagstiftningen.
- Presentera arbetet inom biosfären för allmänhet, forskare och studenter.

### **11.10 Kompetensutveckling**

Det systemekologiska perspektivet som introduceras kräver att kunskaper från radioekologin integreras med systemekologiska principer som baseras på naturliga mekanismer. Det kommer att ske genom att bygga upp kompetensen vid Studsvik med systemekologi och/eller andra konsulter. Men också att föra in radioekologiska problemställningar till ekologer vid universitet och högskolor för att trygga en långsiktig återväxt och aktiv forskning i framtiden.

En kompetensuppbyggnad sker genom en satsning på experimentellt arbete vid Kalmars Högskola Marinbiologiska laboratorium som berör upptagsmekanismer och transport av radionuklider genom näringskedjan i akvatiska miljöer.

## 12 Annat långlivat avfall

Låg- och medelaktivt avfall transporteras till slutförvaret SFR i Forsmark. Det mesta avfallet kommer från driften av kärnkraftverken, som behandlar och förpackar avfallet före transport till SFR. En mindre del kommer från forskning, industri och medicin och sådant avfall packas och mellanlagras i Studsvik, som själva producerar liknande avfall. Studsvik har ett eget bergrum för mellanlagring.

En del av avfallet i Studsvik innehåller emellertid för mycket långlivade ämnen för att det skall kunna tas emot av SFR. Det rör sig huvudsakligen om avfall från forskning och sådant avfall sätts för närvarande åt sidan. Även en del förbrukade interna delar från kärnkraftreaktorerna, inklusive hårdkomponenter, innehåller för mycket långlivade radionuklider för att kunna gå till SFR. De lagras för närvarande på CLAB (eller vid kärnkraftverken). Därför kommer en separat del att byggas – troligen i anslutning till djupförvaret för använt bränsle – där allt långlivat låg- och medelaktivt avfall kunde deponeras. Den här delen skulle även ta emot det kortlivade avfallet från driften av CLAB och inkapslingsanläggningen som uppstår efter att SFR har stängts och förslutits. Driftavfall och rivningsavfall skulle uppgå till ungefär hälften av det totala inventariets volym.

Den separata delen av SFL, avsedd för annat långlivat avfall än utbränt bränsle, skall bestå av tre olika utrymmen kallade SFL 3, SFL 4 och SFL 5. I SFL 3 skall långlivat avfall från Studsvik deponeras och sådant "SFR-avfall" som uppstår efter att SFR har stängts. Till SFL 4 kommer rivningsavfallet från CLAB och inkapslingsanläggningen att skickas, liksom diverse överbliven utrustning i form av transportbehållare o d. SFL 5 skall ta emot de interna delarna från reaktorerna.

En förstudie av funktionen hos barriärerna i SFL 3-5 genomfördes och rapporterades 1995 /12-1/. Utgångspunkten var den konceptuella design som presenterats i SKB:s Planrapport från 1993, samt en ny inventering och karakterisering av avfallet. Mängden radionuklider i avfallet hade uppskattats liksom en del andra komponenter av betydelse, t ex metaller, organiskt material, betong etc. I förstudien prövade vi att använda scenarimetoden som då var relativt ny. En del forskningsarbete initierades, och utländska organisationer med erfarenhet inom det här området kontaktades för informationsutbyte och samarbete, t ex Nirex, Nagra och ANDRA.

Målet, som angavs i föregående FUD-program beträffande långlivat låg- och medelaktivt avfall, var att *förbereda kommande säkerhetsanalyser*, men under perioden har detta utvidgats till att *genomföra en preliminär säkerhetsanalys*. Arbetet bedrivs nu liksom tidigare i projektform. Ett första steg i genomförandet av uppgiften har varit att förbättra uppskattningen av avfallets sammansättning och få en ny design på anläggningen.

### 12.1 Låg- och medelaktivt avfall till SFL

Avfallet till SFL 3 skall komma från Studsvik, CLAB och inkapslingsanläggningen. Låg- och medelaktivt avfall från Studsvik förpackas huvudsakligen i 200 liters plåtfat eller i betongkokiller. Fällningar konditioneras med cement direkt i faten. Fat med askor sopor och skrot har ett inre mindre fat och en fyllning av betong mellan faten. Övrigt låg- och medelaktivt avfall från Studsvik förpackas i mindre plåtfat på 85 liter vilka i sin tur placeras

i färdiga betongkokiller med kantlängden 1,2 m och plats för 5 fat. Mindre mängder avfall kan vara förpackat på annat sätt. Avfallet från Studsvik innehåller en del organiskt material och det förekommer även giftiga metaller som bly, kadmium och beryllium.

Driftavfallet från CLAB förpackas för närvarande i betongkokiller med kantlängden 1,2 m. Jonbytarmassor konditioneras med cement och fast avfall kringgjuts. Vi har antagit att framtida driftavfall från inkapslingen kommer att hanteras på samma sätt.

Den totala volymen av förpackat avfall i plåtfat eller betongkokiller i SFL 3 uppskattas till ca 6 000 m<sup>3</sup>, därav kommer 2 000 m<sup>3</sup> från Studsvik och 4 000 m<sup>3</sup> från CLAB och inkapslingsanläggningen. Den dominerande radionukliden i avfallet är <sup>63</sup>Ni under de första 700 åren och därefter dominerar <sup>59</sup>Ni. Som år 0 har vi valt 2040 vilket är det år man kan räkna med att försluta anläggningen. Det beräknade aktivitetsinnehållet i olika avfallstyper baserar sig på erfarenheter från mätningar och användningen av s k korrelationsfaktorer (för icke mätta nuklider).

Avfallet till SFL 4 kommer att vara lågaktivt och bestå av rivningsavfall från CLAB och inkapslingsanläggningen, transportbehållare, och lagringskassetter för använt bränsle från CLAB. Deponeringen i SFL 4 kommer således i ett sent skede. Rivningsavfallet från CLAB består av kontaminerade metalledar från kyl- och reningssystem i anläggningen, samt rester av kontaminerad betong som bilats bort. Lagringskassetterna för använt bränsle från CLAB kommer antingen att dekontamineras och eventuellt friklassas eller deponeras i SFL 4. Vi har tills vidare antagit det senare. Rivningsavfallet från inkapslingsanläggningen blir av samma typ som från CLAB, men mängderna blir mindre. Allt rivningsavfall förpackas i plåtådor med kantlängden 2,4 m.

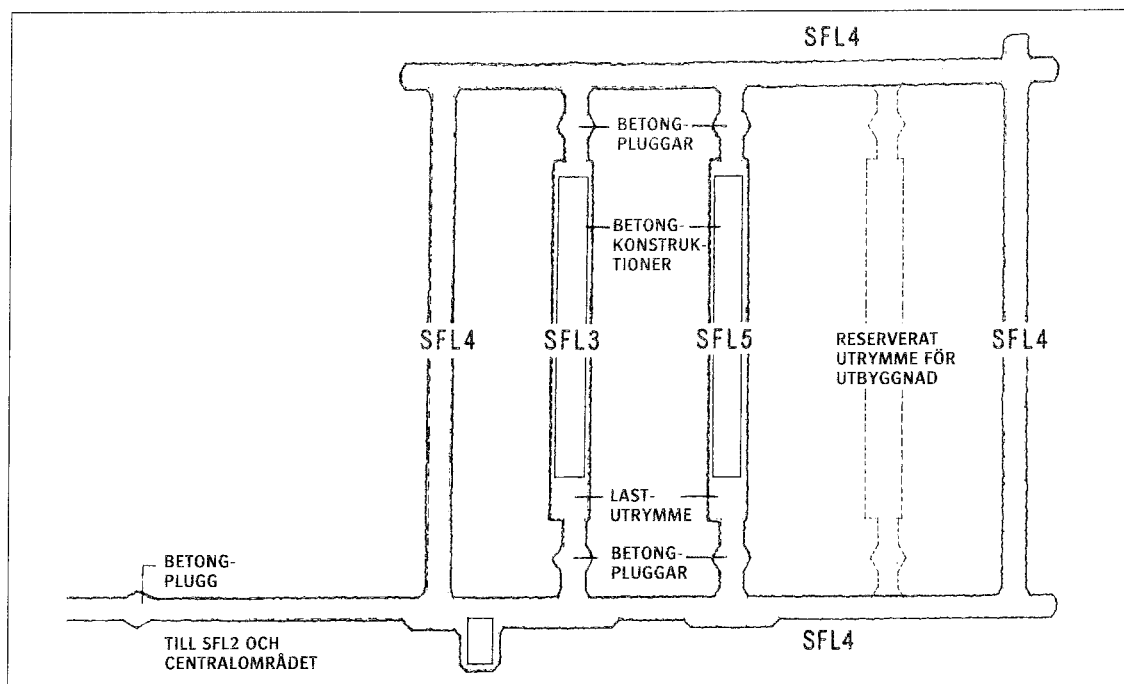
Den totala volymen avfall till SFL 4 uppskattas till 10 000 m<sup>3</sup>. Det mesta utgörs av stål och betong. Vi räknar med att kunna undvika organiskt material. Aktivitetsinnehållet i SFL 4 blir relativt litet och dominerat av <sup>60</sup>Co under de första 20 åren.

Avfallet till SFL 5 skall bestå nästan enbart av metalledar som suttit långt inne i reaktorerna och därför är neutronaktiverade och även ytkontaminerade (från primärt reaktorvatten). Vid rivning av kärnkraftverken skall stora kvantiteter av lågaktivt rivningsavfall transporteras till SFR för slutförvaring, interna delar och hårdkomponenter kommer att mellanlagras i CLAB minst 30–40 år innan de slutförvaras i SFL 5. Det gäller även komponenter med hög specifik aktivitet som har bytts under tiden reaktorn varit i bruk. Vi räknar även med framtida rivningsavfall från forskningsreaktorn i Studsvik. Avfallet till SFL 5 kommer enligt nuvarande planer att förpackas i 4,8 m långa och 1,2 m breda betongkokiller med en inre stålkassett. Förpackningen återfylls med cementbruk.

Den totala volymen avfall till SFL 5 uppskattas till omkring 10 000 m<sup>3</sup>. Avfallet består av rostfritt stål och en del andra metaller men inget organiskt material ingår. Det förekommer en del giftiga metaller som bly (blyboxar) och beryllium (Studsviksavfall). Aktivitetsinnehållet i SFL 5 är högre än i SFL 3 och 4. Vid tiden för slutlagring så dominerar <sup>63</sup>Ni, <sup>60</sup>Co och <sup>3</sup>H (från BWR styrtavar). I ett längre perspektiv så är det <sup>63</sup>Ni som dominerar under de första 700 åren och därefter <sup>59</sup>Ni.

## 12.2 Förvarsutformning och layout

Baserat på mängden avfall och de typer av avfallskollin som föreslagits så har en ny layout av SFL 3-5 tagits fram /12-2/. Den här delen föreslås bli ett annex till djupförvaret för utbränt bränsle, SFL 2. Meningen är att placera SFL 3-5 på ett djup av mellan 300 och



Figur 12-1. Översiktlig plan av SFL 3-5.

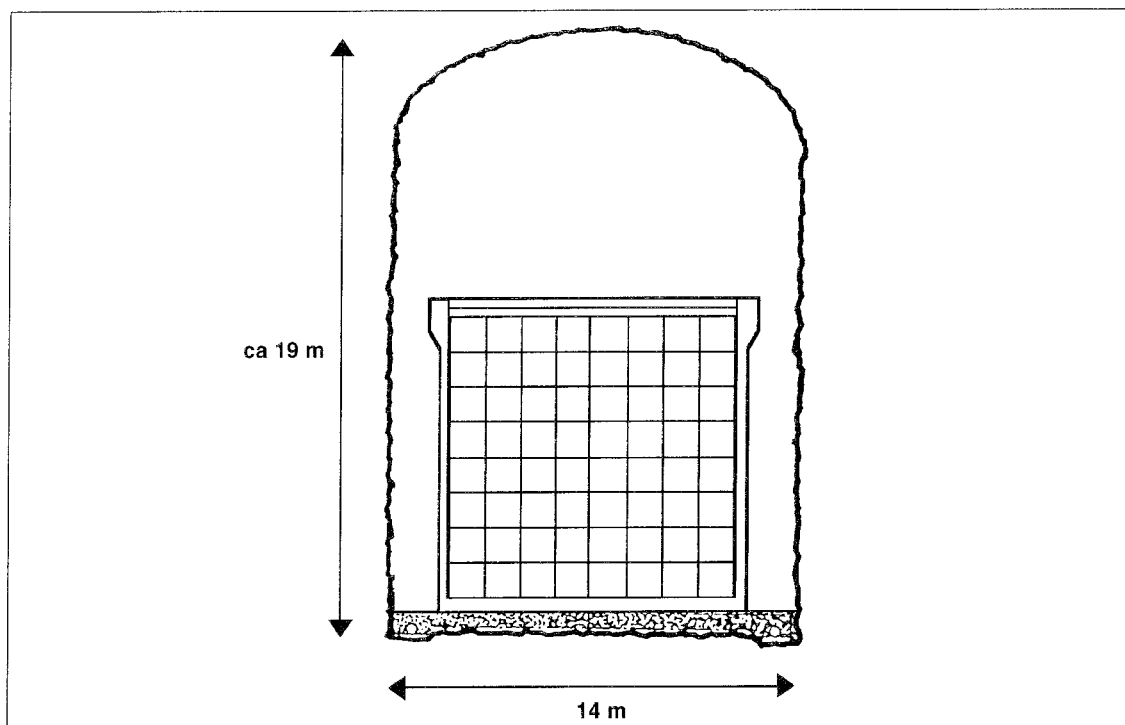
400 m med ett avstånd på minst 1 km från SFL 2. De två förvarsutrymmena SFL 3 och 5 utgörs av två identiska bergsalar och SFL 4 är helt enkelt tunnlar som ligger runt SFL 3 och 5, se Figur 12-1. Mycket av erfarenheterna från SFR har utnyttjats. Utformningen av SFL 3 och 5 är baserad på bergsalen för låg- och medelaktivt avfall i SFR, se Figur 12-2.

SFL 3 består av en bergsal med en inlastningsdel för avfall i ena änden och en inlastningsdel för betong i den andra änden. De två anslutande tunnlar är så långa att tunnelploggar kan gjutas efter avslutad deponering. Inbyggnaden är uppdelad i tre separata sektioner som i sin tur är uppdelade med tvärväggar i 7 olika fack. Avfallskollin placeras in i facken och kringgjuts stegvis med porösbetong. När en sektion är fylld så täcks den över med lock (betongplank) och pågjutning av betong. Efter avslutad deponering återfylls bergsalen med bergkross och betongpluggar gjuts.

När deponeringen i SFL 3 och 5 är avslutad så kan transporttunnlar utanför, dvs SFL 4, användas för deponering. SFL 4 avskiljs från övriga utrymmen med hjälp av betongpluggar. Totalt behövs ca 700 m tunnel för att rymma allt rivningsavfall och övrigt avfall. Avfallskollin ställs på tunnelns körbanor av betong som i sin tur ligger på packat grus. Efter avslutad deponering återfylls tunnlar med krossat berg.

SFL 5 är i stort sett identisk med SFL 3. Det är möjligt genom att driftavfall och hårdkomponenter fått samma standardmodul. Betongkockillerna staplas i facken och kringgjuts med porösbetong.

Genom att SFL 3 och 5 är lika så kan man om så erfordras omfördela avfallet mellan dem. Det är också möjligt att förlänga SFL 3 och 5, eller bygga ytterligare en bergsal parallellt med två andra, se Figur 12-1. Beträffande SFL 4 så har ca 700 m av totalt tillgängliga ca 900 m tagits i anspråk.



*Figur 12-2. Typsektion av SFL 3 och SFL 5. Betongkonstruktionen med sina avfallskollin vilar på en bädd av grus. De tomma utrymmena mellan berget och betongkonstruktionen återfylls med krossat berg vid förslutningen.*

### 12.3 Funktion och säkerhet

De konstruerade barriärerna i SFL 3-5 utgörs av avfallskollin, återfyllning av porösbetong, betongkonstruktioner, återfyllning av krossat berg och betongpluggar. Betongens stabilitet och inverkan på den kemiska miljön är av betydelse för barriärernas egenskaper. Det är vanligen Degerhamn Standard Portlandcement som används. Den är sulfatresistent genom sitt låga innehåll av aluminium. De lösliga alkalihydroxiderna i färsk cement orsakar ett högt pH. Om alkalihydroxiderna lakas ut så sjunker pH något och stabiliseras av portlandit i stället (pH 12,5). Det kommer att ta mycket lång tid att laka ut all portlandit ur förvaret och det är väsentligen detta som kommer att bestämma kemin i närområdet, även på mycket lång sikt. Kemisk retention av radionuklider genom låg löslighet, hög sorption och långsam diffusion är väsentliga egenskaper hos barriärerna i förvaret.

Grundvattnet kan påverka kemin i närområdet och medverka till spridning av radionuklider. Även om förvaret ligger djupt och platsen väljs med omsorg så får man räkna med ett visst vattenflöde i bergsprickorna omkring förvaret, men flöde i betongkonstruktionerna och avfallet undviks genom att leda förbi vattnet i återfyllningen av krossat berg (hydraulisk bur). Det är ett enkelt och fördelaktigt arrangemang. Johan Holmén har gått igenom de hydrogeologiska förhållandena i SFL 3-5 och presenterat detta i doktorsavhandling vid Uppsala Universitet /12-3/.

Eftersom vattenflödet i betongkonstruktionen och avfallet blir mycket låg så spelar diffusionen en större roll. För att beräkna transporten av radionuklider från en skadad

kapsel i SFL 2 så har man utvecklat datorkoden NUCTRAN /12-4/. Lite förenklat kan man säga att NUCTRAN arbetar som en tredimensionell beräkningsmodell med finita differenser, men färre antal celler behövs vilket kortar ner beräkningstiderna. Den här metoden går även att applicera på närområdet för SFL 3-5. Det har testats genom att använda både NUCTRAN och TRUMP och sedan jämföra resultaten. Datorkoden TRUMP använder den traditionella metoden med finita differenser för sådana här beräkningar. Jämförelsen visade att NUCTRAN med fördel kan användas för att beräkna frigörelse av radionuklider från SFL 3-5 /12-5/.

System- och processbeskrivningar används som metod för att analysera förvarets långsiktiga säkerhet. Arbetet bygger vidare på den scenariobeskrivning som togs fram i samband med förstudien /12-1/. Exempel på viktiga processer i SFL 3-5 är vattenflöde, gas-transport, metallkorrosion, kemisk degradering av organiskt material, cementupplösning, ettringitbildning, och allt som har med frigörelse och transport av radionuklider att göra.

## 12.4 Laboratorieundersökningar

Laboratorieundersökningar genomförs med målet att ta fram erforderliga data och modeller för att analysera den långsiktiga säkerheten. Arbetet är främst inriktat på radionuklidernas kemi i förvaret (löslighet, sorption, diffusion etc), inverkan av organiska ämnen och betongens utveckling. Inför den preliminära säkerhetsanalysen av SFL 3-5 så sammanställs kemiska basdata om betongen, vattensammansättning (i förvaret), sorption, diffusion och löslighet av radionuklider, samt inverkan av organiskt material. Experiment pågår och en del är rapporterat. Avsikten är att det experimentella programmet skall fortsätta efter att säkerhetsanalysen är genomförd.

Sammansättning och egenskaper hos cement har beskrivits i en teknisk rapport /12-6/. Fastän modern cement av Portlandtyp inte har funnits särskilt länge så finns det anledning att vara mer optimistisk än i tidigare säkerhetsanalyser när det gäller betongens egenskaper på sikt. Det finns en tendens att gammal betong blir bättre med tiden, förutsatt att den förvaras i nära stagnant grundvatten som i ett förvar.

Lakförsök med krossad betong och simulerat grundvatten har utförts /12-7/. Såväl normalt som salt grundvatten efterliknades. Utvecklingen av pH och upplösta joner analyserades. Mineralen undersöktes för att se vilka sekundära faser som bildades. Resultaten utvärderades. Liknande studier har genomförts i t ex Storbritannien och Schweiz. En allmän slutsats är att betongen kontrollerar kemin i närområdet så länge som avfallet är av någon säkerhetsmässig betydelse, åtminstone om grundvattenflödet är lågt.

De flesta mätvärden som behövs för att beräkna sorption, diffusion och löslighet har tagits ur litteraturen, men ytterligare mätningar har gjorts där information saknats eller varit knapphändig. Exempel på detta är inverkan av nedbrytningsprodukter från cellulosa. I betongporvatten kan cellulosa brytas ner till isosackarinsyra som är en stark komplexbildare. Den påverkar t ex lösligheten av plutonium. Ytterligare försök har gjorts för att mäta hur diffusion och sorption av olika radionuklider i cement påverkas av isosackarinsyra /12-8/. Experimenten visar att sorptionen av tre- och fyrvärda aktinider påverkas negativt, men det sker en återhämtning. Isosackarinsyra sorberas själv på cement vilket är den troliga förklaringen till varför radionuklidsorptionen delvis återhämtade sig. Sorptionen av nickel och cesium påverkades inte alls. Arbetet fortsätter och mer resultat är på väg.

Det har hävdats att högt pH från cement skulle kunna minska bergets förmåga till retention. Vittringen skulle täppa till bergets mikroporer och på sätt förhindra den viktiga matrisdiffusionen. Experiment som utförts i samarbete mellan Chalmers, Kärnkemi, och BGS (British Geological Survey) ger inget stöd för sådana antaganden utan visar att matrisdiffusion är möjligt, även efter att vittringsprodukter fällt ut /12-9/.

## 12.5 Mål och program

De övergripande målen för verksamheten är att:

- Inventera och karaktärisera befintligt och förutsett avfall.
- Bearbeta utformningen av förvaret.
- Förbereda och genomföra säkerhetsanalyser.

Arbetet fram till mitten av 1999 bedrivs i projektform (projekt Annat avfall) och målet för projektet är att:

- Genomföra en fullständig säkerhetsanalys av SFL 3-5 och rapportera detta.

När detta är genomfört (till mitten av 99) kommer verksamheten att minska i omfattning, bli mer forskningsinriktad och koncentreras på det övergripande målet att *förbereda framtida säkerhetsanalyser*. För att genomföra den preliminära säkerhetsanalysen så pågår följande verksamhet:

### ***Avfallskaraktärisering***

- Ange mängder och volymer av befintligt och förutsett avfall.
- Beräkna innehåll av olika radionuklider.
- Uppskatta innehåll av olika material.
- Diskutera osäkerheter.
- Sammanställa resultatet i en rapport (dvs en ny version av SKB AR 94-32).

### ***Kemiska basdata***

- Sammanställa mätvärden på diffusion, löslighet, och sorption för radionuklider.
- Bestämma inverkan av organiska ämnen (speciellt cellulosor).
- Rapportera egenskaperna hos grundvatten och betong i förvaret.

### ***Säkerhetsanalys***

- Ta fram scenariobeskrivningar och göra scenarioval.
- Beräkna radionuklidtransport (för valda scenarier).
- Beräkna dos (för valda scenarier).
- Redovisa den långsiktiga säkerheten för SFL 3-5.

Den pågående verksamheten är helt inriktad på att genomföra den preliminära säkerhetsanalysen för SFL 3-5. I och med att det målet är avklarat, så kommer verksamheten inom programmet Annat avfall att minska i omfattning. De personresurser som härigenom blir tillgängliga kan användas för att genomföra funktionsanalyser i andra projekt (t ex SAFE som gör en ny säkerhetsanalys av SFR). Verksamheten inom programmet Annat avfall begränsas till forskning, med målet att förbereda framtida säkerhetsredovisningar. Som ett led i den nya inriktningen på programmet Annat avfall så planerar vi ett samarbete med Studsvik Material för att kunna utnyttja de alfaboxar som finns tillgängliga där. Det skulle göra det möjligt för oss att genomföra experiment med aktinider och organiskt material under relevanta förvarsförhållanden, dvs med betongporvatten och höga pH.

## 12.6 Kompetensutveckling

Den långsiktiga forskningen, som bedrivs för att beskriva radionuklidernas kemi i ett förvar med betong och diverse organiska komponenter, innebär tillskott till forskningsverksamheten inom ämnet Kärnkemi. Resultat och kompetens kommer även att utnyttjas för t ex SFR. Det är framförallt institutionen för kärnkemi på Chalmers Tekniska Högskola som genomfört studierna hittills, men vi har även utnyttjat kärnkemisk kompetens på Universitetet i Linköping (Prof. Bert Allard). Tillgång till alfaboxar på Studsvik Material innebär en ytterligare förstärkning av resurserna för kärnkemiskt arbete. Alfaboxar är en viktig resurs för experiment med aktinider och liknande utrustning i Sverige finns endast på Chalmers Tekniska Högskola.



## 13 Alternativa metoder

### 13.1 Separation och transmutation

#### 13.1.1 Bakgrund

Syftet med transmutation är att avsevärt minska den mängd av långlivade radioaktiva ämnen (radionuklider) som måste slutförvaras.

De ämnen som i första hand bidrar till det använda kärnbränslets långlivade farlighet (radiotoxicitet) är de s k transuranerna dvs främst plutonium men även neptunium, americium och curium. Ett ton använt kärnbränsle innehåller ca 10 kg plutonium och sammanlagt ca 1 kg av de tre övriga transuranerna; med tiden omvandlas ytterligare drygt 1 kg plutonium till americium och sedan till neptunium genom sönderfall av plutonium-241 (ca 14 år halveringstid) respektive americium-241 (ca 430 år halveringstid). Långlivade klyvningsprodukter och aktiveringsprodukter såsom t ex teknetium-99, jod-129, cesium-135 och kol-14 har avsevärt mindre radiotoxicitet men är å andra sidan mer lätttrörliga i den geologiska miljö som finns t ex i svenskt urberg.

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 transuranerna är det i första hand kärnklyvning (fission) som är effektivt, andra kärnreaktioner leder till att andra långlivade radionuklider bildas. Vid kärnklyvningarna 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. Detta utgör ca 95 % av kvarvarande bränsle. 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. Om man å andra sidan vill utnyttja energiinnehållet i det uran som en gång tagits ut ur jordskorpan kan även uranet återföras till reaktorer och via bildat plutonium ge väsentligt mer energi. Upparbetning (och separation av olika ämnen) är således (i båda fallen) en förutsättning för transmutation. Man talar därför ofta om Separation och Transmutation (S&T) som ett begrepp eller vanligare på engelska – Partitioning and Transmutation (P&T).

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 ca 500 år ligga på en nivå jämförbar med den som använt kärnbränsle har efter ca 100 000 år. De kvarvarande långlivade ämnena skulle dock fortfarande kräva ett djupförvar. Utformningen av detta skulle emellertid förändras och kraven på de tekniska barriärerna minska.

Ett första steg som redan tillämpas i flera länder är att upparbeta det använda kärnbränslet och återanvända plutonium och uran i nytt kärnbränsle. Därigenom minskas mängden plutonium i det avfall som skall slutförvaras avsevärt. Detta kan dock endast ske i begränsad omfattning i dagens reaktorer (LWR). Upparbetning och återföring av plutonium kan ske två à tre gånger innan plutonium får sådan sammansättning att reaktorns säkerhets-

och drifttegenskaper påverkas negativt. Vidare medför upprepad återcykling att strål-skyddsproblemen vid bränsletillverkning m m ökar.

Användningen av en kombination av separation och transmutation för att minska mängden av långlivade radioaktiva ämnen i avfall från kärnenergiproduktion förslogs redan 1964 av Steinberg och medarbetare /13-1/. Utvecklingen av separation och transmutation fram till slutet av 1980-talet har beskrivits av Croff i ett arbete publicerat 1990 /13-2/.

I Sverige drevs under 1970- och början av 1980-talet viss forskning finansierad av dåvarande programrådet för radioaktivt avfall (Prav) vid institutionen för kärnkemi på Chalmers Tekniska Högskola. Intresset för denna verksamhet avtog i takt med att intresset för uppbyggnad och plutonium-återföring svalnade.

Intresset för separation och transmutation fick nytt liv genom teknikutvecklingen under slutet av 1980-talet och manifesterades vid en internationell konferens i Saltsjöbaden 1991 /13-3/ och genom politiska beslut i flera länder. Utvecklingen på accelerator-tekniken gjorde att i början på 1990-talet väcktes ett intresse att utvärdera möjligheten att använda accelerator-drivna system för transmutation.

I SKB:s FUD-program 1992 /13-4/ föreslogs att ett djupförvar för använt kärnbränsle skulle byggas ut i etapper. En första etapp skulle omfatta en mindre mängd använt bränsle och följas av en omsorgsfull utvärdering av resultaten från denna etapp och av parallellt pågående forskning och utveckling på alternativa metoder i Sverige eller utomlands. För att ge underlag för denna framtida utvärdering ansåg SKB det angeläget att stödja och i viss mån initiera svenska forskningsarbeten på intressanta alternativa metoder speciellt transmutation av långlivade radioaktiva ämnen. I programmet angavs som speciellt intressant att studera separation av långlivade ämnen, tekniskt möjlig effektivitet för transmutation, materialproblem samt processernas tillförlitlighet och säkerhet.

SKB inledde sålunda ett samarbete med institutionen för kärnkemi vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg samt med Centrum för säkerhetsforskning och institutionen för neutron- och reaktorfysik vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Detta samarbete har under åren vidgats något.

Under 1990-talet har utvecklingen på området sammanfattats i ett antal tekniska rapporter från SKB /13-5, 13-6, 13-7, 13-8/. Läget fram till början av 1998 sammanfattas i en nyligen utgiven rapport på svenska /13-9/. För en mer detaljerad genomgång av olika tekniska frågor och av svenska arbeten hänvisas till dessa rapporter. Vidare hänvisas till fortlöpande rapportering i SKB:s Annual Report för åren 1993–1997 /13-10, 13-11, 13-12, 13-13, 13-14/.

### **13.1.2 Kunskapsläge**

Möjligheten att genomföra separation och transmutation som ett led i hanteringen av använt kärnbränsle och högaktivt avfall kan idag i huvudsak anses som vetenskapligt belagd. Det är emellertid ännu för tidigt att bedöma om denna typ av avfallsbehandling har kostnadsmässiga eller säkerhetsmässiga fördelar i ett kort tidsperspektiv jämfört med nuvarande planer för hantering av använt kärnbränsle och högaktivt avfall. Neutroner från såväl termiska reaktorer som snabbreaktorer och acceleratordrivna underkritiska reaktorer kan utnyttjas för transmutation av långlivade radioaktiva ämnen.

Termiska reaktorer och snabbreaktorer har byggts och drivits med god erfarenhet under lång tid, medan acceleratordrivna system fortfarande bara finns på ritbordet. Var och en

av dessa neutronkällor har sina för och nackdelar vid transmutation och passar förmodligen bäst för vissa bestämda typer av radionuklider. Vid inbördes jämförelse är man idag överens om att transmutation i reaktortyper med högenergetiska (snabba) neutroner har fördelar beträffande reduktion av den totala mängden tyngre transuraner parat med en relativt effektiv energiproduktion. Däremot är reaktorer med lågenergetiska (termiska) neutroner fördelaktiga om man bara vill reducera mängden av vissa radiotoxiska ämnen och producera energi till låg kostnad.

En möjlig utveckling är att man i framtiden använder system med flera reaktortyper. Scenarier för en sådan utveckling har beskrivits bland annat i franska /13-15/ och japanska studier. För energiproduktion och för förbränning av plutonium används termiska reaktorer och/eller snabba reaktorer. De speciella egenskaperna hos ett accelerator-drivet system utnyttjas för att åstadkomma en effektiv transmutation av neptunium, americium och eventuellt curium, samt möjligen även andra radionuklider med små reaktionstvärsnitt. Det acceleratordrivna systemet blir ett komplement till mer konventionella kärnreaktorer.

Som redan nämnts måste alla transmutationsprocesser samverka med en lämplig kemisk separationsprocess där icke transmuterat material med hög verkningsgrad återvinns från bestrålat material. Resten blir radioaktivt avfall. När man bedömer effekten hos en kombinerad separations- och transmutationsprocess finns det en stark koppling mellan återvinningsgraden i separationsprocessen (upparbetningen), transmutationsprocessens effektivitet (utbränning, omvandlingsgrad av långlivade radionuklider) och förlusterna av otransmuterat material till olika avfallsströmmar. Såväl vattenbaserad vätske-vätskeextraktion som olika pyrokemiska separationsmetoder har föreslagits för separationsprocessen.

Kunskaperna om vattenbaserad vätske-vätskeextraktion är stora och bygger på över 40 års driftserfarenheter i industriell skala. Detta medför att man är väl medveten om såväl fördelar som problem med denna teknik. Å andra sidan måste pyrokemiska separationsmetoder för behandling av radioaktiva ämnen ännu anses vara på laborierstadiet och kräver fortfarande en omfattande utveckling av både metoder och nya apparattyper. Detta medför att vi ännu saknar god kännedom om dessa metoders för- och nackdelar vid behandling av radioaktiva ämnen i industriell skala. Det är ännu för tidigt för att försöka jämföra vattenbaserad kemi med pyrokemi på likvärdig kunskapsgrund.

Intresset för pyrokemi är för närvarande störst i USA och Ryssland medan de stora länderna inom EU samt Japan i huvudsak fortsätter att fokusera sina utvecklingsinsatser på förbättring och vidareutveckling av vattenbaserade metoder. Om separation och transmutation skall kunna bli ett realistiskt alternativ till nuvarande bränslecykler krävs fortsatta betydande och långsiktiga FoU insatser på separationstekniken.

Det är idag helt klart att separation och transmutation inte kan eliminera behovet av ett slutlager för högaktivt avfall. I ett kort tidsperspektiv kommer radioaktiviteten hos avfallet till och med att vara högre än i det använda bränslet beroende på att långlivade radionuklider i stor utsträckning omvandlats till betydligt mer kortlivade. De kortare halveringstiderna medför å andra sidan att avfallets farlighet minskar relativt snabbt med tiden. Trots användning av en effektiv separations- och transmutationsteknik kommer avfallet att innehålla mindre mängder av mycket långlivade radioaktiva ämnen.

Bearbetning av bränslet ger också i princip en möjlighet att framställa plutonium eller annat klyvbart material i relativt ren form. Det finns å andra sidan vissa möjligheter att

utforma bränsle, strålmål eller hela acceleratordrivna system mer spridningssäkert än vad som är fallet med vanliga reaktorer och snabbreaktorer.

### **13.1.3 Svenska arbeten**

#### ***Verksamhet vid CTH***

Verksamhet på utveckling av selektiva separationsprocesser med hög verkningsgrad började 1974 vid institutionen för kärnkemi, Chalmers tekniska högskola (CTH), Göteborg, med ekonomiskt stöd från programrådet för radioaktivt avfall (Prav), samt i början även från dåvarande AB Atomenergi.

Projektet ledde fram till försök i pilotskala under början av 1980-talet med användning av 16 liter koncentrerad högaktiv avfallslösning från den gamla norsk-svenska uppberedningsanläggningen i Kjeller, Norge. Funktionen hos såväl kemi som apparatur blev därvid verifierade. Processen fungerade i huvudsak som beräknat och gav mycket god separation vid en extremt hög verkningsgrad, till exempel uppmättes totalverkningsgrader på >99,8 % för neptunium, >99,99 % för plutonium och >99,83 % för americium. Renat högaktivt avfall innehöll efter den vätske-vätske-extraktionsbaserade separationsprocessen mindre än 1/100000 av ursprunglig alfa-aktivitet. Huvuddelen av resultaten finns publicerade /13-9/.

Sedan 1991 driver institutionen för kärnkemi vid Chalmers tekniska högskola ett SKB-finansierat projekt inom separations- och transmutionsområdet och sedan maj 1996 deltar institutionen även i EU-programmet "Nuclear Fission Safety" inom projektet NEWPART (New Partitioning Techniques). Förutom Sverige deltar även CEA (Frankrike), University of Reading (England), Europeiska Transuraninstitutet (EU), Forschungszentrum Karlsruhe (Tyskland), Forschungsanlage Jülich (Tyskland) och ENEA (Italien) i NEWPART projektet. Institutionen har även mer informellt samarbete med LANL (USA) och JAERI (Japan).

Verksamheten vid institutionen innefattar utveckling av nya vattenbaserade separationsprocesser. För att minska mängden avfall från framtida avancerade separationsprocesser innehåller extraktionsreagensen endast kol, väte, syre och kväve (CHON-principen) vilket gör att reagensen är fullständigt förbränningsbara och inte bidrar till det sekundära avfallet. Tre olika typer av reagens studeras.

#### ***Verksamhet vid KTH***

Forskningen på transmutionsområdet vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm koncentreras i huvudsak till acceleratordrivna system (ADS). Denna verksamhet har utvecklats väsentligt under de senaste åren. För närvarande arbetar fem forskare med huvudsaklig finansiering från SKB. Forskningen fokuseras huvudsakligen på:

#### ***Neutronik i acceleratordrivna system***

Noggranna undersökningar av transmutionsbeteendet hos acceleratordrivna system som en funktion av neutronspektrum är nödvändiga. En genomgående analys av simuleringar gjorda med Monte Carlo metoder har utförts. Analysen visar att flytande bly som kylmedel bereder möjlighet att vidmakthålla konstanta transmutionshastigheter för många isotoper

även vid stora variationer i koncentration. Bly gör det också möjligt att nå resonansområdet i tvärsnitten för långlivade klyvningsprodukter som  $^{99}\text{Tc}$  och  $^{129}\text{I}$ .

### *Utbränningsberäkningar*

En koppling mellan en Monte Carlo kod för simulering av neutronik vid fix sammansättning av bränslet och en utbränningskod har utvecklats som del av ett projekt inriktat på att skapa ett komplett verktyg för beräkningar på acceleratordrivna system.

### *Spallationsprocessen*

Förståelsen för acceleratordrivna system är ofullständig utan studier av spallationsprocessen. Dessa utförs med hjälp av högenergitransportkoden FLUKA. Beräkningar av värmeutveckling i samt optimering av strålmål är bland de viktigare resultaten hittills.

### *Radiotoxicitet*

Studier av radiotoxicitet i ämnen som bildas i spallationsprocessen och dessas bidrag till toxiciteten hos avfallet från ett acceleratordrivet system i ett längre perspektiv utförs med hjälp av beräkningskoderna FLUKA och ORIGEN.

### *Tillförlitlighet och säkerhet för acceleratorer*

En studie med mål att skapa en databas med information om acceleratorbeteende för att möjliggöra sannolikhetsbaserade säkerhetsanalyser och tillförlitlighetsprojektioner. Projektet har initierats i samarbete med LANL (Los Alamos National Laboratory) i USA.

### *Internationellt samarbete*

Det internationella samarbetet är främst fokuserat på projekt gemensamma med Los Alamos-laboratoriet i USA och IPPE (Institute of Physics and Power Engineering) i Obninsk, Ryssland. KTH-gruppen har formulerat, tilldelats och genomfört certifieringsprocessen för ett ISTC-projekt – tillverkning av ett strålmål av flytande bly/vismut – i Obninsk. Strålmålet är en oundgänglig del i den experimentella verksamhet som behövs för att förbereda en eventuell framtida demonstrationsanläggning för acceleratordrivna system. (ISTC, International Science and Technology Center i Moskva finansierat i huvudsak av USA och EU). Målet är att med LANL:s linjära accelerator genomföra bestrålning av det tillverkade strålmålet inom 2–3 år från nu.

Gruppen deltar även i studier av underkritisk kinetik i den franska MASURCA-reaktorn vid CEA/Cadarache, som drivs av en extern neutronkälla.

Ett samarbete med EU:s forskningscentrum i Ispra, Italien har inletts för att med simuleringsverktyg undersöka termohydraulik hos flytande metaller.

Avdelningen för reaktor- och neutronfysik, KTH, koordinerar EU-projektet IABAT (Impact of Accelerator BAsed Technologies on nuclear fission safety).

## **Övrig verksamhet inom landet**

Vid The Svedberg-laboratoriet i Uppsala drivs ett projekt för mätning av tvärsnitt för neutroner i högenergiområdet 20 till 100 MeV vilket bland annat har stort intresse för att ge underlag för beräkningar på accelerator-drivna system. Projektet finansieras bland annat med bidrag från SKB, kärnkraftverken och kärnkraftinspektionen.

### **13.1.4 Bedömning av framtiden för separation och transmutation**

Internationellt råder en betydande enighet bland ansvariga organisationer och experter om att även en framgångsrik utveckling av separation och transmutation (S&T) inte kommer att eliminera behovet av ett djupförvar /13-16, 13-17/. Däremot kan det förändra konstruktionsförutsättningarna för djupförvaret och dess barriärer och kraftigt minska mängden av långlivade radionuklider som måste deponeras i djupförvaret.

Utveckling av S&T innebär utveckling av ny kärnteknik och kräver betydande resurser och tid. Omfattande nationella program pågår i Frankrike och Japan. Fransmännen siktar i enlighet med en lag från 1991 mot ett etappmål 2006. Kostnaderna för programmet anges till M\$ 600 på 15 år /13-19/.

Japanerna har ej angivit något preciserat tidsschema för sitt program. Kostnaderna ligger i storleken 10-tals M\$ per år /13-19/.

I USA har Los Alamos National Laboratory föreslagit ett i första hand femårigt utvecklingsarbete inriktat mot accelerator-driven transmutation /13-18/. Kostnaden anges till ca M\$ 115. Ambitionen är att sedan fortsätta med en demonstrationsanläggning i halv skala.

Inom EU finns förslag till ökad satsning på utveckling av accelerator-drivna system bland annat baserade på de idéer som framförts av Carlo Rubbia vid CERN /13-16/.

Dessa program är dock bara början av utvecklingen innan man kommer till de nödvändiga bekräftande storskaliga försöken. En framgångsrik utveckling och tillämpning av S&T 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 bland annat inom EU.

Förutsättningarna för en tillämpning av S&T 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. Utveckling och tillämpning av S&T är bland annat med hänsyn till tid och kostnader avsevärt mer trolig i ett scenario med fortsatt användning, förnyelse och eventuell expansion av kärnenergi än i det motsatta fallet.

I det svenska scenariot med ett lagfäst beslut att ej bygga ny kärnkraft kräver en eventuell framtida inhemsk tillämpning av S&T att detta beslut modifieras – det vore orimligt att bygga en anläggning för S&T utan att tillgodogöra sig den energi som utvecklas i transmutationsprocessen. Ett tänkbart framtida alternativ är möjligen också att ”köpa” separation och transmutation vid utländska anläggningar och sedan ”bara” ta hand om avfallet.

Kostnaderna för S&T är naturligtvis omöjliga att beräkna med någorlunda säkerhet innan man har bestämt systemets huvudsakliga utformning. Ett scenario för USA omfattande anläggningar för accelerator-driven transmutation av 70 000 ton använt kärnbränsle från de ca 100 amerikanska LWR /13-18/ har en angiven uppskattad kostnad på ca 320 miljarder kronor i investering och ca 10 miljarder kronor per år för drift under 65 år – eller totalt närmare 1 000 miljarder kronor på ca 65 år. Utvecklingskostnader tillkommer. Under denna tid skulle mängden transuraner minskas från ca 600 ton till mindre än 1 ton. Samtidigt erhålles ca 4 000 TWh elkraft (värda ca 0,25 kr/kWh eller totalt ca 1 000 miljarder kronor). Hur djupförvarskostnaderna kommer in i denna kalkyl är oklart.

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.

Tillämpning av S&T är i ett avseende något av ett ”allt eller intet företag” om motivet enbart är att ”förenkla” slutförvaringen. Det fordras att allt använt kärnbränsle undergår behandlingen. Om det blir någon delmängd som undantas kommer denna delmängd att i princip kräva samma tekniska barriärer, utveckling och licensiering (och väcka samma oro och frågor) som om allt använt bränsle direktdeponeras.

Utvecklingen av ny kärnteknik kan också ha målet att effektivare ta tillvara energiinnehållet i det uran som utvinns ur jordskorpan. I detta scenario kan transmutation vara en intressant och viktigt ”biprodukt” som avsevärt kommer att påverka den framtida hanteringen av det använda kärnbränslet.

Utveckling inom S&T har visat sig väcka starkt intresse hos många. Fortsatta insatser kan bidra till att vidmakthålla en hög kompetens på kärnteknikområdet under den tid som detta utgör en betydande resurs i samhället.

Det finns en bred vetenskaplig övertygelse om att nuvarande typer av bränslecykler i kombination med planerad avfallshantering och geologiska slutförvar kommer att ge ett tillfredsställande skydd för mänskligheten för all överskådlig framtid. Det finns dock samtidigt ett betydande intresse av att undersöka om en ytterligare minskning av den framtida potentiella farligheten hos avfallet kan erhållas genom separation och transmutation och till vilken kostnad detta kan ske. Styrkan hos en separations- och transmutationsprocess skulle vara att drastiskt minska även de hypotetiskt tänkbara framtida konsekvenserna av oförutsedda händelser. Å andra sidan kan en bred satsning på utveckling av separations- och transmutationsprocesser komma att dölja det faktum att de framtida riskerna från ett väl utfört djupförvar redan bedöms som mycket små.

### **13.1.5 Program för perioden 1999–2004**

#### ***Mål***

Målet för SKB:s FoU 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,

- att 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. Således skall enligt kraven på alternativredovisning en bedömning av S&T-metoder ingå i underlaget för beslut om lokalisering av inkapslingsanläggning och djupförvar. En samlad bedömning skall vidare ske vid utvärderingen efter det första steget med deponering av inkapslat kärnbränsle i djupförvar.

## **Arbetsinriktning**

SKB:s huvuduppgift är att ta hand om och slutförvara kärnbränsleavfallet på ett säkert sätt (kärntekniklagens §10). SKB har också ett ansvar för att följa och medverka i utvecklingen på olika alternativa sätt att ta hand om använt kärnbränsle samt att utvärdera hur dessa metoder kan påverka den långsiktiga förvaringen. Detta är i hög grad förenligt med huvudlinjen att bygga i ett första steg av ett djupförvar för inkapslat använt bränsle.

SKB konstaterar att acceleratordrivna system f n är den alternativa utvecklingslinje för S&T 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 klarställas 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.

SKB avser att fortsätta bedriva inhemsk forskning vid universitet och högskolor i ungefär nuvarande omfattning. Syftet med forskningen skall i första hand vara att medverka till att grundläggande tekniska frågor kring separation och transmutation klarläggs. Särskilt bör inriktningen vara mot frågor om säkerhet, material, processutformning och avfallsströmmarnas sammansättning. Därigenom skapas inhemsk kompetens och SKB får ett underlag för att bedöma utsikterna för och egenskaperna hos system för S&T. 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.

## **13.2 Deponering i djupa borrhål**

### **13.2.1 Geovetenskapliga förutsättningar**

Ett av de alternativ för djupförvaring som studeras av SKB är deponering av kapslar i mycket djupa (2000–4000 m) borrhål, det s k VDH-konceptet (Very Deep Hole). Under den senaste treårsperioden har en studie i kunskapsuppbyggande syfte genomförts av de geovetenskapliga förhållandena på stora djup (1000–5000 m) i kristallin berggrund /13-20/. I en inledande del av studien sammanställs tillgängliga geovetenskapliga data från relevanta geologiska miljöer i olika delar av världen. Dessa data baserar sig på undersökningar i djupa borrhål och gruvor samt på geofysiska mätningar från markytan. Den ämnesvisa



presentationen omfattar: litologi, sprickmineralogi, sprickbildning, temperatur, permeabilitet, portryck, mekaniska egenskaper, bergspänningsförhållanden, seismicitet, vattenkemisk sammansättning och bakteriell aktivitet. Baserat på dessa data har därefter en integrerad tolkning genomförts och en konceptuell geovetenskaplig modell av generella förhållanden ner till 5 km djup föreslagits. Sammanfattningsvis dras följande slutsatser om dessa geovetenskapliga förhållanden:

- Det är relativt enkelt att litologiskt sett göra prediktioner i granitisk berggrund ned till ca fem kilometer.
- Sprickmineralogin kan vara en indikator på hur en observerad spricka bildats. Om mineralsammansättningen är i jämvikt med omgivande bergart är sprickan troligtvis bildad under duktila förhållanden. Om så icke är fallet är sprickan sannolikt bildad under sprödtektoniska förhållanden. Sprödtektoniska sprickor är troligen mest vattenförande.
- Yt- och borrhålsgeofysiska data visar att graden av öppna sprickor minskar signifikant under ca en kilometer.
- Även om det råder viss brist på data visar studien att den genomsnittliga permeabiliteten är ca tre storleksordningar lägre på 5000 m djup jämfört med 1000 m djup.
- Generellt sett följer portrycket det hydrostatiska trycket. (Undantaget är det djupa Kola-borrhålet där ca 50 % högre tryck uppmätts i intervallet 1000–2800 m).
- De mekaniska egenskaperna i termer av deformation och brotthållfasthet kan mätas vid ytan och är relevanta mot djupet.
- Bergspänningsförhållandena tycks växa linjärt med djupet till ca fem kilometer. Vertikalspänningens magnitud ligger generellt sett mellan de horisontella huvudspänningarnas vilket avspeglar en tektonisk regim som präglas av strykningsrörelser ("strike-slip").
- Grundvattnet ned till åtminstone ca 500 m djup är en blandning med olika ursprung, men där sött meteoriskt vatten dominerar. Undantag är områden under tidigare HK som på grundare nivåer kan uppvisa rester av relik saltvatten. På stora djup, dvs under 1000 m, förekommer ofta vatten med mycket höga salthalter, s k brines.
- Den geotermiska gradienten i Fennoskandiska skölden är 15–20°C/km. (Dessa temperaturgradienter har också predikerats med hänsyn till värmeflödet i sköldens litosfär).
- Sverige har vid internationell jämförelse en låg jordskalvsaktivitet. Man kan emellertid ej utesluta jordskalv med magnituder av storleksordningen 5 eller 6. Några jordskalv har under 1900-talet förekommit med epicentra i de övre 5 kilometerna.
- Nya undersökningar har visat att bakterier lever på stora djup i berggrunden, oberoende av biosfären, och förmår bilda metan. Detta innebär att vissa tidigare tolkningar av grundvattnets kemiska utveckling kan komma att modifieras.

Generellt sett kan man beskriva berggrunden med att den övre kilometern innehåller betydligt fler öppna sprickor än de djupare delarna. Vattenhållande eller vattenförande sprickzoner finns dock ner till mycket stora djup. I områden med förhållandevis flack topografi är aktiv grundvattencirkulation i huvudsak begränsad till den övre kilometern

medan vattnet har relativt hög salthalt under denna nivå. Det mycket salta, djupa grundvattnet befinner sig i en nästan stagnant miljö. I områden med större topografiska skillnader kan sötvatten som infiltrerar drivas ner till djupare nivåer. Detta är grunddragen i den konceptuella geovetenskapliga modellen.

### 13.2.2 Mål och program

För den kommande sexårsperioden, 1999–2004, har SKB som mål att:

- genomföra en systemanalys av det alternativa förvaret med djupa hål,
- genomföra en säkerhets- och funktionsanalys för VDH-konceptet.

De borrh tekniska förutsättningarna har berörts i ovan nämnda studie men det krävs att deponeringstekniken är utvecklad och värderad så att en radiologiskt säker hantering åstadkoms. En uppföljning av den tidigare genomförda s k PASS-studien (Project Alternative Systems Study) /13-21/ planeras därför att bli genomförd. När systemanalysen föreligger skall en relativt omfattande funktions- och säkerhetsanalys utföras. Studien kommer att baseras på de databaser och den konceptuella modell som nu tagits fram.

I avsaknad av djupa borrhningar kan den föreslagna konceptuella modellen testas och eventuellt förbättras med hjälp av vissa geovetenskapliga mätningar och studier. I så fall kan dessa arbeten integreras med SKB:s övriga program för utveckling av undersökningsmetoder samt samordnas med de insatser som görs för stödjande geovetenskaplig FoU.

## 14 Äspölaboratoriet

### 14.1 Inledning

Ett förslag om byggande av ett underjordiskt berglaboratorium lades fram i FoU-program 86 /14-1/ och fick ett mycket positivt mottagande av remissorganen. Under hösten 1986 påbörjade SKB fältarbeten för lokalisering av det underjordiska berglaboratoriet till Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun. I slutet av 1988 fattade SKB ett principbeslut om lokalisering av laboratoriet till södra Äspö ca 2 km norr om Oskarshamnsverket. Efter myndighetsprövning och godkännande inleddes anläggningsarbeten hösten 1990. Anläggningsens ovan- och underjordsdelar stod färdiga 1995.

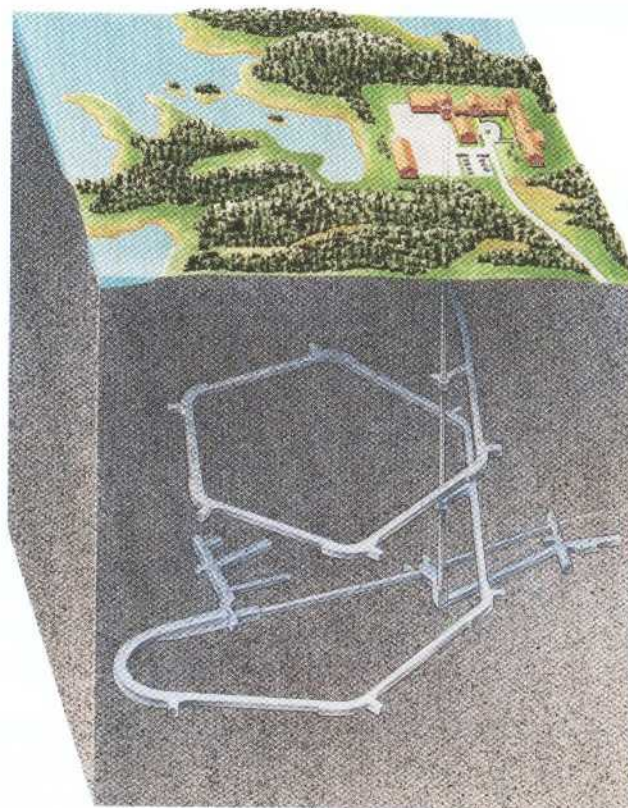
Arbetet med Äspölaboratoriet indelas i tre skeden – förundersöknings-, anläggnings- och driftsskedet. Under **förundersökningsskedet, 1986–1990**, skedde lokalisering av Äspölaboratoriet. De naturliga förhållandena i berggrunden beskrevs och förutsägelser gjordes med avseende på de geohydrologiska m fl förhållanden som skulle observeras under anläggningsskedet /14-2/. Planering för byggnads- och driftsskedet genomfördes.

Under **anläggningsskedet, 1990–1995**, genomfördes omfattande undersökningar och försök parallellt med anläggningsverksamheten. Utbyggnaden av tunneln till 450 m djup och anläggandet av Äspö By slutfördes. Äspö By togs i drift under sommaren 1994. Anläggningsarbetena under jord slutfördes under sommaren 1995.

**Driftsskedet inleddes 1995.** Ett preliminärt program för de undersökningar och experiment som skulle genomföras under driftsskedet presenterades redan i en underlagsrapport till FUD-program 92 /14-3/. I detta program anges inriktningen på de undersökningar och försök som planeras bli genomförda under tidsperioden 1999–2004.

Äspölaboratoriet har utformats för att tillgodose de grundläggande behov som den planerade forsknings-, utvecklings- och demonstrationsverksamheten kan komma att kräva. Undermarksdelen är utformad som en tunnel från Simpevarpshalvön till södra delen av Äspö. På Äspö går huvudtunneln i två varv ner till ett djup av 450 m (Figur 14-1). Tunnelns totala längd är 3600 m. Den första delen av tunneln är utbruten genom sprängning. De sista 400 metrarna bröts ut med en tunnelborrningsmaskin (TBM) med 5 meters diameter. Undermarksdelen är ansluten till ovanjordsdelen med ett hisschakt och två ventilationsschakt. Ovan jord finns Äspö By med kontorsutrymmen, förråd samt hiss- och ventilationsbyggnad (Figur 14-2).

Allt eftersom fler forsknings- och demonstrationsprojekt har tillkommit så har nya experimentområden under jord erfordrats. Under vintern 1996/1997 utökades anläggningen med ca 200 meter nya forskningstunnlar på nivåerna -420 m respektive -450 m. Under januari-februari 1998 bröts ytterligare ca 30 m forskningstunnlar ut. Den vid laboratoriet fast stationerade personalen har också ökat successivt och kontors och förrådsdelarna byggdes ut under vintern 1997/1998. Utbyggnaden inkluderar en mötes- och utställningsdel samt förråd och laboratorier.



*Figur 14-1. Äspölaboratoriets underjordsdel når ett djup av 460 m. Underjordsdelen är förbunden med kontor, verkstäder och förråd ovan jord med ett hisschakt och två ventilationschakt.*



*Figur 14-2. Översiktsvy över Äspö By.*

## 14.2 Mål

Ett av de grundläggande motiven bakom SKB:s beslut att anlägga Äspölaboratoriet var att skapa en möjlighet till forskning, utveckling och demonstration i en realistisk och ostörd bergmiljö ned till det djup som planeras för det framtida djupförvaret.

Äspölaboratoriets huvudsakliga roll i SKB:s FUD-verksamhet är att fungera som en generalrepetition inför driftsättandet av ett djupförvar. Forskningsprogrammet organiseras med utgångspunkt från att de steg som erfordras för att driftsätta ett djupförvar först provas vid Äspölaboratoriet. Erfarenheterna från Äspölaboratoriet utnyttjas sedan vid genomförandet på den valda platsen.

Viktiga uppgifter för Äspölaboratoriet är att

- utveckla, prova, utvärdera och demonstrera metoder för platskaraktisering, 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 samt
- informera utomstående om teknik och metoder som utvecklas för djupförvaret.

Arbetet i Äspölaboratoriet innebär en fortsättning på den tradition av internationellt samarbete och fältexperiment i realistisk djupförvarsmiljö som inleddes redan 1977 i den nedlagda järnmalmgruvan i Stripa i Bergslagen.

För att uppfylla den övergripande tidsplanen för SKB:s FUD-arbete har fyra etappmål för verksamheten vid Äspölaboratoriet ställts upp. De ursprungligen formulerade etappmålen reviderades i och med att driftsskedet inleddes och gavs i FUD 95 /14-4/ följande lydelse:

1. **Verifiera förundersökningsmetoder:** Demonstrera att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå.
2. **Fastställa detaljundersökningsmetodik:** Vidareutveckla och verifiera de metoder som behövs vid karaktisering av berget vid detaljundersökning av en plats.
3. **Pröva modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion:** Vidareutveckla och på förvarsdjup pröva metoder och modeller för beskrivning av grundvattenflöde, radionuklidmigration och kemiska förhållanden under förvarets driftsperiod samt efter förslutning.
4. **Demonstrera teknik för och funktion hos viktiga delar i förvarssystemet:** I full skala pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter som har betydelse för långtidssäkerheten hos ett djupförvarssystem och visa att det går att säkerställa hög kvalitet i utformning, byggande och drift av systemets komponenter.

Verksamheten vid Äspölaboratoriet planeras för närvarande pågå till dess den inledande driftsetappen 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. Resultat från sådana experiment förväntas utgöra ett väsentligt underlag inför ansökan om reguljär drift av djupförvaret.

Äspölaboratoriet utgör en viktig del av det arbete som bedrivs inom SKB:s FUD-program. Kraven på forskningens kvalitet är mycket höga och en övergripande ambitionsnivå är att Äspölaboratoriet utvecklas till ett internationellt ledande centrum för forskning, utveckling och demonstration rörande anläggningar för djupförvar av högaktivt avfall.

### 14.3 Genomförda projekt

I detta avsnitt ges en kort sammanfattning av de huvudresultat som erhållits vid Äspölaboratoriet. Mer detaljerade redovisningar av resultaten finns i de projektrapporter som refereras till nedan och i Äspölaboratoriets årsrapporter /14-5, 14-6, 14-7, 14-8/.

#### 14.3.1 Verifiering av förundersökningsmetoder

En viktig del i verksamheten under Äspölaboratoriets förundersöknings- och anläggningsskede omfattade utveckling och prov av olika förundersökningsmetoder samt utveckling och prov av modeller för beskrivning av bergets funktion i djupförvarssystemet. Målet var att visa att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå. Resultaten från undersökningar på marken och i borrhål användes för att successivt bygga upp mer detaljerade modeller över bergarter, geologiska strukturer, geohydrologi, grundvattenkemi samt bergmekaniska förhållanden på Äspö. I och med att förundersökningsskedet avslutades hösten 1990 redovisades modeller och förutsägelser om de bergförhållanden som skulle påträffas i och med att tunneln byggdes /14-2, 14-9, 14-10, 14-11/. Dessa förutsägelser har sedan kontrollerats i samband med de undersökningar som genomförts under anläggningsskedet. Etappmålet ”Verifiering av förundersökningsmetoder” slutrapporterades under 1997 /14-12, 14-13, 14-14, 14-15, 14-16/. De metoder som använts och erfarenheterna från deras praktiska användning har också redovisats /14-9, 14-17/.

Förundersökningar eller platsundersökningar innebär att många olika vetenskapliga discipliner skall integreras, både vad avser insamling av data om bergets egenskaper och utvärdering av resultat. Baserat på en sammanvägd utvärdering av erhållna mätvärden formuleras modeller som utgör kvantitativa eller kvalitativa beskrivningar av bergets egenskaper och de processer som är av betydelse för ett djupförvars konstruktion, funktion under driftsskedet samt dess långsiktiga säkerhet efter förslutning. Vid undersökningarna på Äspö användes en strategi med successiv uppdatering och detaljering av modellerna allteftersom nya mätvärden tillkom. Vid uppdateringarna gjordes vid behov förnyade utvärderingar av sedan tidigare insamlade mätvärden. Den tillämpade strategin befanns fungera väl och bör i allt väsentligt tillämpas i framtida platsundersökningar.

Den geologiska modellen ger en förenklad beskrivning av bergartsfördelning, större strukturer och bergets sprickighet. Denna modell utgör grunden för de mekaniska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska modellerna av en plats då den beskriver geometri

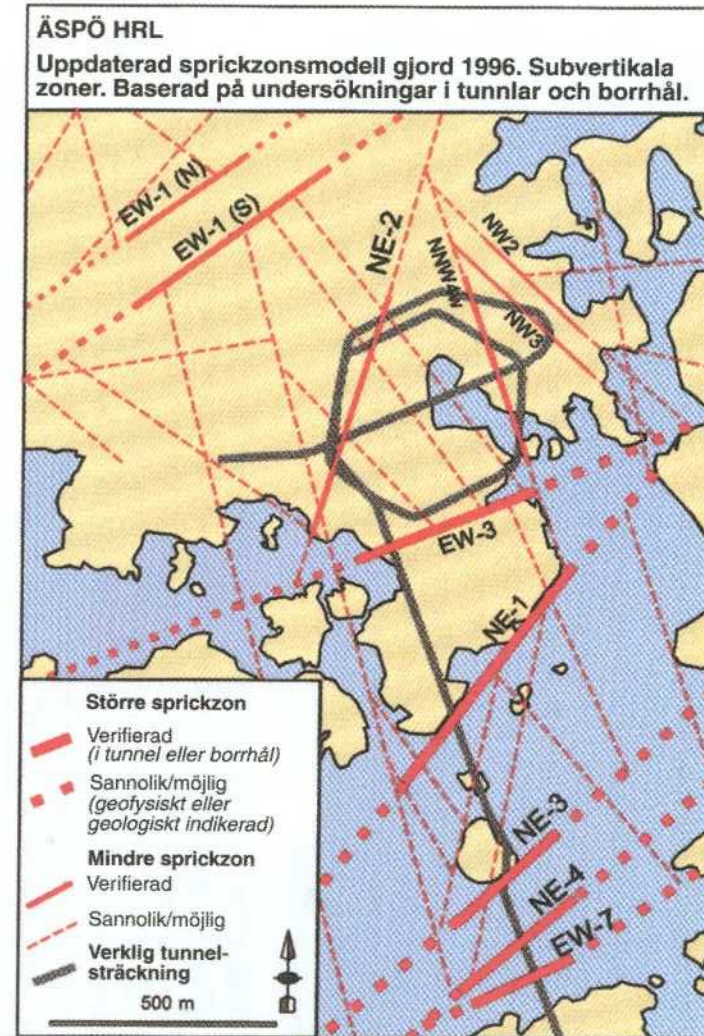
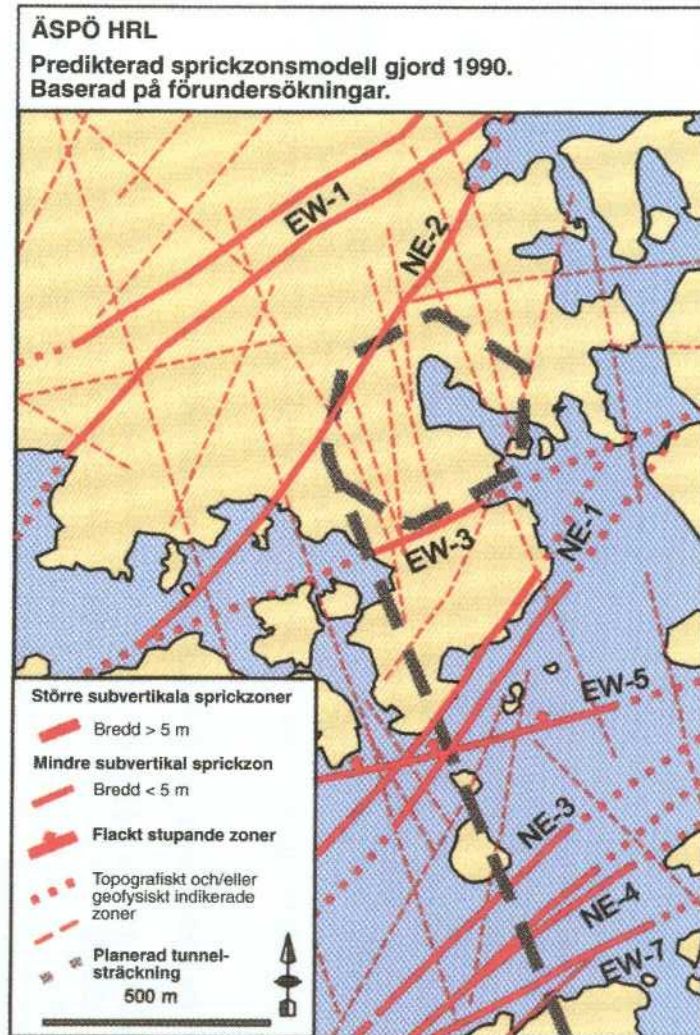
och egenskaper hos de geologiska strukturer som är av betydelse för grundvattenflöde, kemi och möjliga bergrörelser. Den geologiska modell som togs fram innan tunneln påbörjades har i allt väsentligt bekräftats av undersökningarna i tunneln eller i borrhål från tunneln. Överensstämmelsen är som man kan förvänta inte exakt och avvikelser förekommer vilket kommenteras ingående i /14-13, 14-14, 14-15/. Trots att bergartsfördelningen på Äspö är förhållandevis heterogen var det möjligt att förutsäga relativ andel och geometrisk fördelning av huvudbergarterna. När det gäller förekomst av bergarter som uppträder som smala oregelbundna gångar, såsom finkornig granit och grönsten, var det endast möjligt att förutsäga den relativa förekomsten. De större sprickzonernas läge, egenskaper och geologiska karaktär visade sig stämma väl med observationerna från tunneln (Figur 14-3). Förekomsten av mindre sprickzoner, företrädesvis brantstående med en nordnordvästlig strykning, identifierades vid förundersökningarna. Undersökningarna från tunneln visade att det inte är möjligt att förutsäga det exakta läget av dessa mindre zoner. Däremot erhöles en god statistisk beskrivning av dessa mindre zoner, dvs en beskrivning av hur ofta de förekommer samt deras huvudsakliga orientering och hydrauliska egenskaper.

Bergets hydrauliska egenskaper har bestämts genom mätningar i enskilda borrhål och genom mätningar mellan borrhål. Flera olika metoder har använts och mätningar har genomförts i olika skalor. Mätvärdena har sedan utnyttjats för att modellera grundvattenflöde och tryckfördelning på Äspö. Flera olika modeller, baserade på olika beskrivningar av hur vattenflödet fördelar sig i berget, har prövats (se även avsnitt 14.4.2). För beräkningar av flödesfördelningen i kilometerskala har i huvudsak en stokastisk kontinuummodell använts som tar hänsyn till inverkan av skillnader i vattnets densitet (olika salthalt). Denna modell har givit en god överensstämmelse mellan beräknade och mätta grundvattentryck (Figur 14-4) och salthalter. Undersökningarna av grundvattenkemin har resulterat i modeller över hur grundvattnets sammansättning utvecklats sedan den senaste istiden.

Mer än 10 års arbete på Äspö avseende karakterisering av berggrunden har visat att relevanta modeller som väl beskriver förhållandena på en vald plats kan tas fram genom tillämpning av tillgänglig metodik av god kvalitet för karakterisering, dataanalys, modellering och sammanvägd utvärdering. Detta visar att verktyg finns för insamling av data från markytan och i borrhål samt för modellering av en plats så att dess lämplighet för lokalisering av ett djupförvar kan bedömas. De data som insamlats från Äspö har använts i säkerhetsanalyser av ett tänkt förvar på Äspö, dels av SKI i den så kallade SITE-94 och dels av SKB i SR 97. Data på väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå kan således erhållas från markytan och i borrhål. Undersökningarna från Äspötunneln har huvudsakligen bekräftat de modeller som gjordes innan tunneln började byggas. De nya data som erhållits från tunneln har givit underlag för successiv detaljering av modellerna men inte förändrat den grundläggande bilden av förhållandena på Äspö.

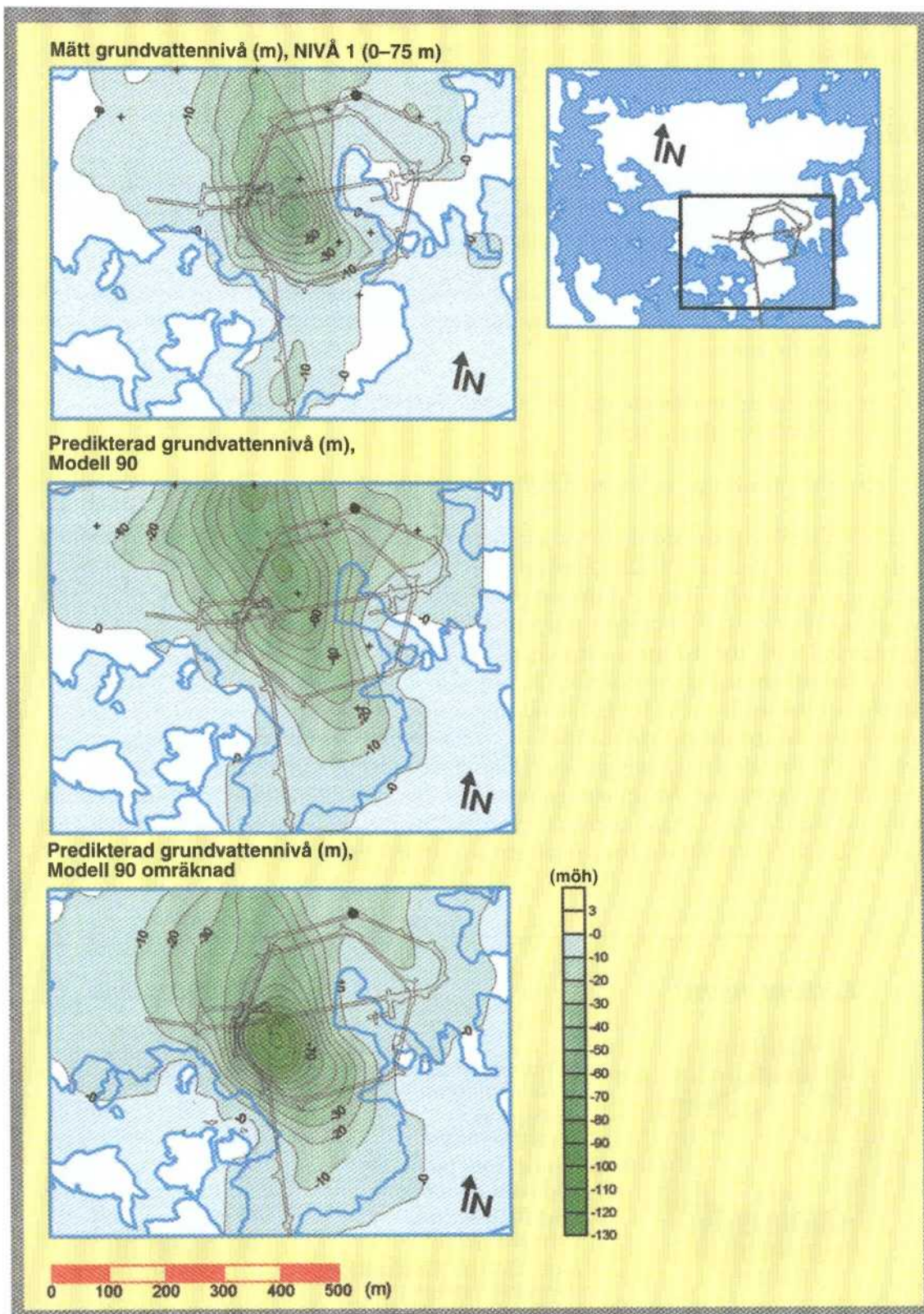
### **14.3.2 Fastställande av detaljundersökningsmetodik**

Vad avser det andra etappmålet, Fastställande av detaljundersökningsmetodik, så har mycket erfarenhet vunnits om tillämpningen av många olika undersökningsmetoder under jord, i synnerhet vad avser samordning av detaljerade undersökningar med tunnelbyggande. De undersökningsmetoder som använts för detaljundersökningarna i samband med byggandet av Äspötunneln kommer att redovisas i en rapport motsvarande den som sammanfattar erfarenheterna från förundersökningsskedet /14-17/. Denna rapport avses ge en redovisning av hittills vunna erfarenheter för varje använd metod. Ytterligare utveckling av



Figur 14-3. Strukturmodell över Äspö som visar de större strukturernas läge på markytan. Den modell som gjordes före (vänster) respektive efter (höger) anläggandet av tunneln.





*Figur 14-4. Mätta och beräknade grundvattennivåer för den tidpunkt då Äspötunneln nått ett djup av 400 m. Mätta värden (överst), beräknade värden med antagna värden för inflödet till tunneln (mitten), beräknade värden baserade på faktiskt inflöde till tunneln (nederst).*

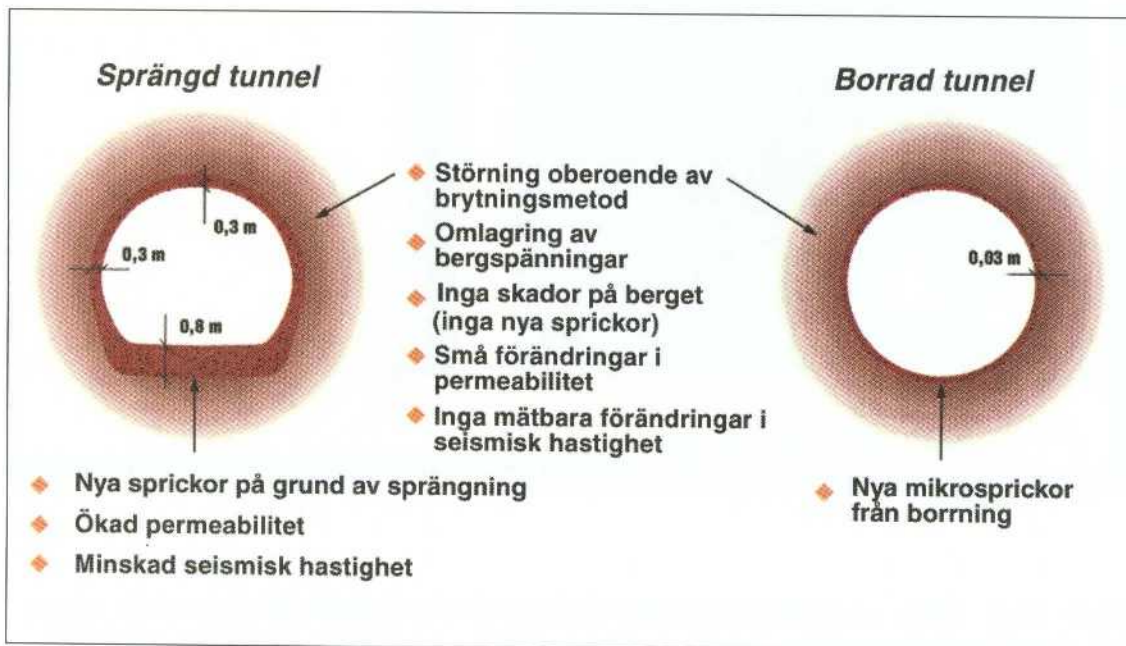
metoderna kommer att ske i huvudsak i samband med de projekt som genomförs i Äspö-laboratoriet.

## **ZEDEX**

ZEDEX-projektet genomfördes för att studera förändringar i bergets egenskaper i närheten av tunnlar, den så kallade störda zonen, vilken kan ha betydelse för förhållandena i förvaret innan förslutning och dess långsiktiga funktion. ZEDEX projektets mål var

- att öka förståelsen av den störda zonens mekaniska egenskaper med avseende på dess ursprung, karaktär, förändring i egenskaper, geometrisk utbredning samt dess beroende av brytmetod,
- att genomföra undersökningar för att öka förståelsen av den störda zonens hydrauliska betydelse samt
- att pröva utrustning och metodik för kvantifiering av den störda zonens egenskaper.

ZEDEX-försöket genomfördes i två parallella tunnlar på 420 m djup. Den ena tunneln hade brutits ut genom borrhning med en TBM-maskin och den andra genom sprängning. Båda tunnlarne hade cirkulär profil och var 5 m i diameter. Projektet slutrapporterades i början av 1998 /14-18/. Försöket visar att det finns en störd och en skadad zon runt tunnlarne. I den störda zonen, där bergets egenskaper i huvudsak är oförändrade (Figur 14-5), skapas inte några nya sprickor på grund av tunnelbrytningen. Den störning som erhålls är oberoende av brytningsmetod men beror däremot på tunnelns form, bergets egenskaper, bergspänningarnas storlek och anisotropi. Förändringarna i bergspänningar och därtill hörande förskjutningar kan leda till förändringar i befintliga sprickors hydrauliska egenskaper. Mätningar genomförda före och efter tunnelbrytning resulterade i mätbara förändringar i transmissivitet i endast 10-15 % av testerna. De få förändringar som observerats innefattade både ökning och minskningar i transmissiviteten.



Figur 14-5. Sammanfattning av de väsentligaste slutsatserna från ZEDEX-projektet.

I den skadade zonen runt den sprängda tunneln observerades nya makroskopiska sprickor orsakade av sprängningarna. I sulan var uppsprickningen omfattande och nådde djup av upp till 80 cm. I väggen är uppsprickningen mer oregelbunden men nådde ställvis ett djup av ca 30 cm från tunnelväggen. De makroskopiska sprickorna ger också upphov till ökad permeabilitet och minskad seismisk hastighet. I den TBM-borrade tunneln har några skador på berget inte observerats vid mätningarna in-situ utan där har data från mikroskopiska studier av prover tagna från väggen visat på en uppsprickning upp till 3 cm från tunnelväggen. Resultaten visar att en systematisk ökning av permeabiliteten runt en tunnel är begränsad till den skadade zonen. Detta innebär att eventuell transport av radionuklider i berget längs en tunnel kan begränsas genom tillämpning av lämpliga brytmetoder och stoppas genom lämpligt konstruerade pluggar.

### ***Hydrotestutrustning för underjordsbruk***

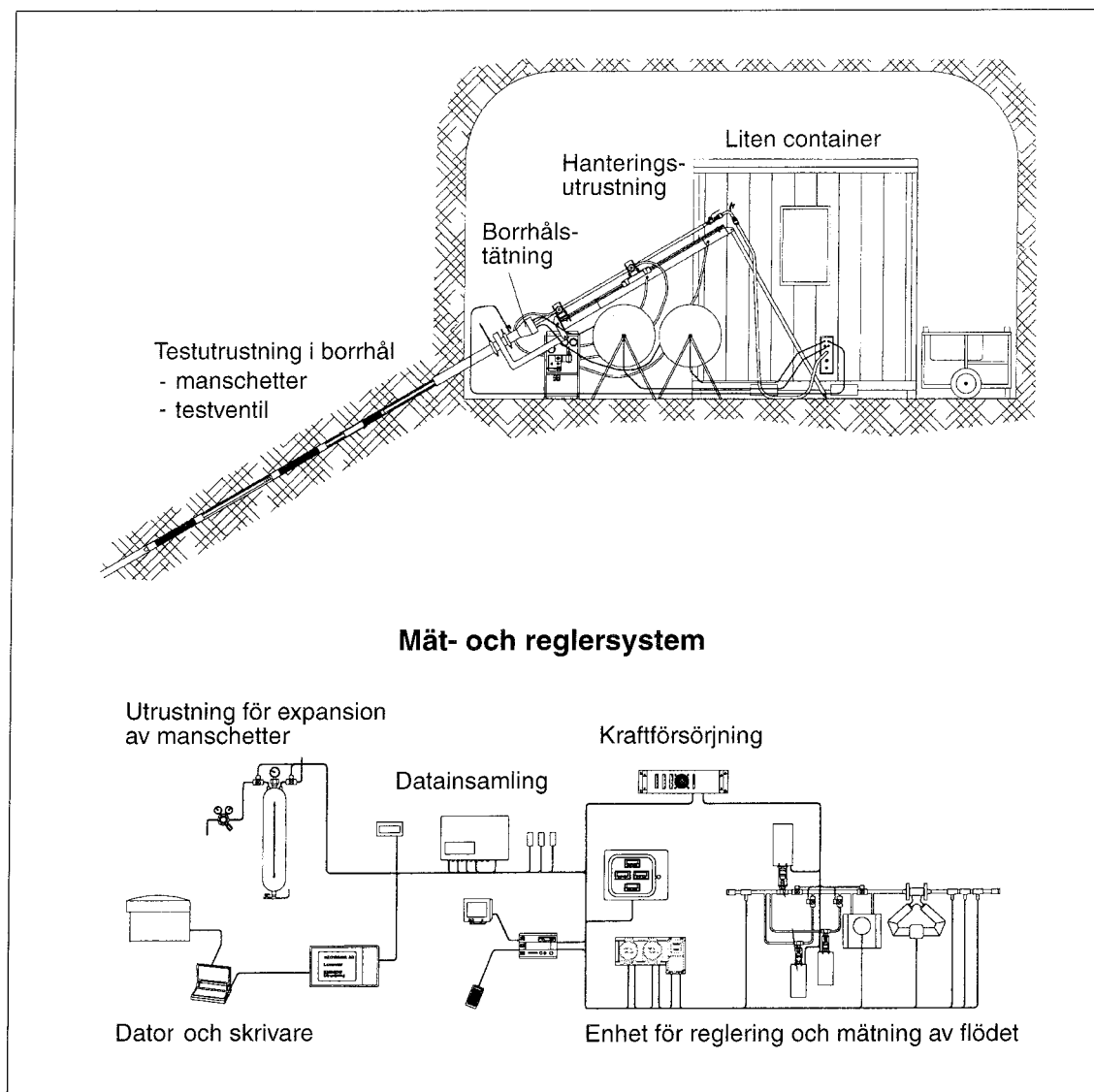
För ovanjordsmätningar har SKB sedan länge tillgång till vad som kan kallas för standardutrustningar för hydrauliska injektionstester och pumptester. För underjordsbaserade mätningar, dvs mätningar i borrhål från tunnlar eller schakt, ställs delvis andra krav avseende mätteknik, robusthet och anpassning till mätplatsens begränsningar. De kritiska kraven vid underjordstesterna har varit kopplade till höga tryck och stora vattenflöden, en kombination som ger större krav på utrustning ju djupare ner i berget mätplatsen är belägen. En flexibel, lätthanterlig och säker hydrotestutrustning som snabbt kan etableras vid mätplatser under jord har tagits fram och använts med framgång inom flera projekt (Figur 14-6) /14-7/.

### **14.3.3 Test av modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion**

I Äspölaboratoriets regi har tredimensionella modeller utvecklats som kan beskriva flöde av grundvatten med varierande salthalt inom en volym tillräckligt stor för att vara representativ för ett djupförvar /14-2, 14-19, 14-20/. Förmågan att ta fram representativa data för att beskriva grundvattenflöde och radionuklidtransport studeras i en internationell arbetsgrupp, s k Task Force, där data från Äspö används i flera principiellt olika grundvattenflödesmodeller, se avsnitt 14.4.2 för en mer detaljerad redogörelse. Allmänt sett har hittills god överensstämmelse erhållits mellan modellerna och verkligheten /14-21, 14-22/. Fortsatt arbete planeras inom detta område, framför allt för att få ytterligare underlag för att pröva modeller för transport av radionuklider som reagerar med bergets mineral, s k sorption, vilket ger en långsammare transport av radionuklider jämfört med transport med det strömmande grundvattnet.

### ***Klassificering och karakterisering av sprickor***

Projektets mål är att ta fram relevanta koncept och data på sprickegenskaper som kan hanteras i radionuklidtransportmodelleringar och som är baserade på en sortering av sprickorna i ett fåtal relevanta klasser. En detaljerad kartläggning har gjorts av de vattenförande sprickor och mindre sprickzoner som skär Äspötunneln. Dataunderlaget har även kompletterats med detaljkartering av spricksystemet på markytan. Resultaten visar att de vattenförande strukturerna på Äspö utgörs av brant stående förkastningar med i huvudsak nordvästlig strykning /14-23/. Vattenförande strukturer med nordöstlig strykning förekommer i mindre omfattning. De vattenförande strukturerna kan indelas i 5 klasser utgående från strukturernas geometriska komplexitet, förekomst av sidospäckor (splay cracks) m m. Klassificeringen är inte unik utan en strukturs egenskaper förändras normalt



*Figur 14-6. Utrustning för genomförande av hydrauliska tester under jord (UHT-1).*

längs dess utsträckning. Längden på segment med likartade egenskaper (tillhörande samma klass) är i storleksordningen några meter till tiotals meter. Den utvecklade metodiken har sedan tillämpats för att göra en strukturell modell över den bergvolym där TRUE-1 försöken genomförs, se avsnitt 14.4.3. Projektets slutrapport utkommer under 1998.

### **REX – Redoxförsök i detaljskala**

Grundvattnets redoxförhållanden under naturliga förhållanden är väl kända /14-24/. Under tunnelbyggnads- och driftfasen kan den ökade vattenomsättningen påverka redoxförhållandena utöver det som gäller under ostörda förhållanden. Effekten av att syresatt ytvatten snabbt transporteras ned i berget har undersökts i det sk blockskaliga redoxexperimentet som pågått 1991–1993 i Äspötunneln. Resultaten visar att i detta fall och andra där halten av organiskt material i det inströmmande ytvatten överstiger 10 mg/l kommer bakteriella

processer att förbruka syret nära markytan. Ett beräknat redoxgenombrott på 70 m djup uteblev fullständigt, även om ytvatten transporterades ned i beräknad takt /14-25/.

I förvaret finns vid förslutning stora mängder syre. Detta syre förbrukas på olika sätt via reaktioner med berg, återfyllnadsmaterial och bentonitlera. Det finns dock en hypotetisk möjlighet att syre kan angripa kopparkapseln och åstadkomma korrosion. I REX-projektet studeras reaktionskinetiken för reduktion av syre med berg för att få data på hur snabbt det syre som finns i förvaret vid förslutning kommer att förbrukas. I försöket deltar forskare från ANDRA, PNC och SKB.

Laboratorieförsök för studier av syreförbrukning genomförs på bergprover från Äspö där syrets reaktionshastighet har bestämts /14-26/. Laboratorieförsök visar också att syre kan konsumeras av metanogena bakterier. Prover har också tagits för att bestämma de naturliga halterna av lösta gaser i grundvattnet på Äspö. Ett fältförsök för studie av syrets reaktionshastighet har påbörjats och beräknas bli avslutat i början av 1999.

### ***Avgasning av grundvatten och tvåfasflöde***

Den trycksänkning som uppstår i närheten av tunnlar och öppna borrhål kan orsaka avgasning av grundvattnet som ger upphov till tvåfasflöde och därmed till förändringar i de hydrauliska egenskaperna. Kunskap om dessa förändringar är väsentligt för att förstå de observationer av hydrauliska egenskaper som görs från orter och tunnlar, för att tolka experiment som genomförs i närheten av orter samt för funktionen hos buffert- och återfyllnadsmaterial, speciellt i samband med återfyllnad och förslutning av djupförvaret.

De laboratorieförsök som genomförts har visat på reduktioner av transmissiviteten i sprickor på grund av avgasning (bubbelbildning) med upp till en faktor tio. Storleken i transmissiviteetsminskning har visat sig vara en funktion av mängden löst gas i vattnet och sprickans struktur. I sprickor med variabel apertur erhålles större minskning av transmissiviteten än i sprickor med slät yta /14-27, 14-28/.

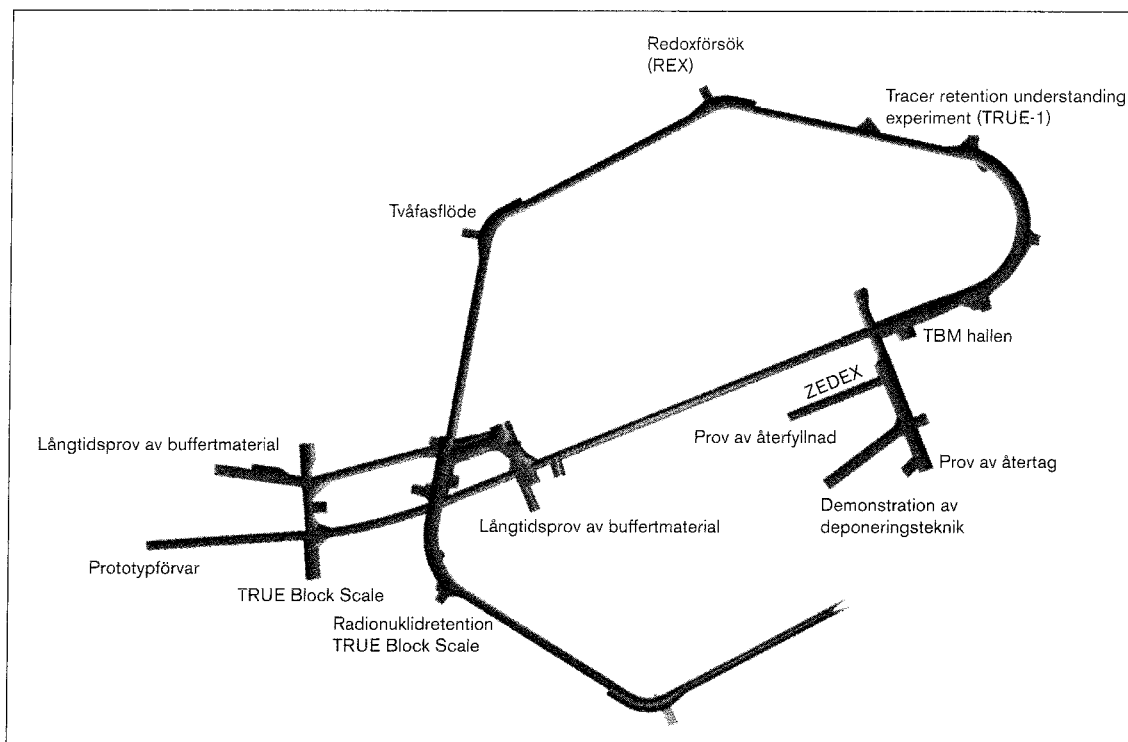
Vid de fältförsök som genomförts har transmissiviteetsminskningar inte observerats vid inflöde av naturligt grundvatten till borrhål. En reduktion i transmissiviteten på ca 50 % erhöles dock vid ett försök där gashalten i grundvattnet på konstgjord väg höjts till ca 15 %. Analys av erhållna resultat och underliggande teori visar att minskning av transmissiviteten vid inflöde till borrhål inte är att förvänta vid de gashalter som förekommer i grundvattnet på Äspö, normalt ca 3 %. Effekter på grund av avgasning kan dock förväntas kring orter på grund av deras större diameter /14-28, 14-29, 14-30/. En modell för avgasning i sprickor har utvecklats som väl beskriver erhållna resultat från laboratorieförsöken /14-8/.

Projektet avrapporteras i början av 1999.

## **14.4 Resultat från pågående projekt och forskningsprogram 1999–2004**

### **14.4.1 Genomförande och organisation**

Insatserna vid Äspölaboratoriet genomförs liksom SKB:s övriga FoU-arbeten genom uppdrag till universitet, högskolor, forskningsinstitutioner, konsulter, industrier och andra svenska och utländska forskare. Härigenom ges möjlighet till att hålla en genomgående hög



*Figur 14-7. Tunnelsystemet under 300 m nivån och placering av de olika experimenten.*

kompetens och kvalitet. För olika undersökningar och experiment har man möjlighet att välja den mest lämpade kvalificerade experten. För vissa frågor kan man pröva olika alternativa vägar eller modeller.

Med FUD-programmet som grund utarbetas årliga planeringsrapporter som relativt detaljerat beskriver det närmaste årets arbete. Verksamheten vid Äspölaboratoriet drivs i huvudsak i projektform. De olika forskningsprojekten leds av projektledare och Äspölaboratoriets personal svarar för organisation och genomförandet av arbeten på Äspö.

Placeringen av de olika experimenten inom Äspölaboratoriet redovisas i Figur 14-7.

#### **14.4.2 Basforskning vid Äspölaboratoriet**

Vid Äspölaboratoriet bedrivs en viss basforskning som inte är knuten till projekt. Denna verksamhet syftar till att utgöra ett stöd till forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprojekten genom att driva och genomföra mätningar av gemensamt intresse för samtliga projekt, att tillhandahålla resultat och sammanställa modeller från olika vetenskapsområden samt driva och förvalta SKB:s geodatabas.

#### ***Geovetenskapliga modeller***

Geologiska formationers lämplighet som berggrund för djupförvaring av använt kärnbränsle kommer enligt SKB:s planering att utvärderas med hjälp av bland annat geovetenskapliga modeller över platsen ifråga avseende:

- geologisk modell,
- geohydrologisk modell,
- geomekanisk modell,
- grundvattenkemisk modell,
- värmetransportmodell,
- transportmodell för radionuklider.

Dessa modeller sammanställs som ett led i en platsundersökning och redovisar en sammanställning av den kunskap som finns om en plats.

På Äspö har geovetenskaplig information systematiskt samlats in under förundersöknings- och anläggningsskedet. 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 meters nivå har använts vid utarbetande av platsspecifika modeller över förhållandena på Äspö. Modellerna innehåller dimensionalitet, material-egenskaper, metod för angivande av egenskaper i hela modellen, randvillkor, numeriska eller matematiska verktyg samt vilka parametrar modellen skall redovisa. Struktur och innehåll beskrivs närmare i /14-16/. Syftet med framtagandet av dessa modeller har i huvudsak varit att verifiera vår förmåga att kunna förutsäga en bergmassas egenskaper på basis av information från gjorda platsundersökningar.

De befintliga modellerna över Äspö kommer successivt att omarbetas, framför allt med hjälp av den nya information som löpande kommer fram från de projekt som redovisas nedan. En geomekanisk och en värmetransportmodell kommer också att tas fram under kommande treårsperiod samtidigt som underlag samlas in för komplettering av den transportmodell för radionuklider som kommit till användning i SKB:s säkerhetsanalyser av ett djupförvar. Grundvattenflödesmodellen över Äspö vidareutvecklas för att ge randvillkor till de experiment som redovisas nedan. Begränsade insatser förutses även vad avser utveckling av de numeriska modellerna för att förenkla och effektivisera införande av randvillkor samt konditionering av modellerna baserat på mätta värden.

### **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 HMS systemet (Hydro Monitoring System). Systemet har successivt byggts ut och omfattar nu även ett större antal borrhål under jord. De borrhål som tillhör experiment såsom TRUE-1 och TRUE Block Scale har efter hand anslutits till systemet. Grundvattentrycket mäts normalt varannan timme och mätvärdena sparas i en databas. Systemet ger möjlighet att mäta störningar av grundvattennivåerna orsakade av olika händelser i laboratoriet. Dessa mätvärden kan sedan användas för att vidareutveckla och utvärdera olika hydrauliska modeller över Äspö samt att kontrollera randvillkoren för olika försök. HMS kommer att byggas ut i takt med de behov som definieras av de olika projekten.

Övervakning av grundvattentrycken på Äspö är också ett krav enligt vattendomen.

### **Grundvattenkemimonitering**

Prover av grundvattnets sammansättning har tagits regelbundet under Äspölaboratoriets förundersöknings- och anläggningsskeden som ett led i utveckling och provning av de

hydrogeokemiska modellerna. Provtagningen har fortsatt under driftsskedet för att följa de förändringar i grundvattenkemin som anläggningen ger upphov till. Prover tas nu regelbundet från borrhål ovan och under jord.

Erhållna data utgör underlag för prov av modeller för grundvattenflöde och grundvattenkemi samt förståelse av anläggningens långsiktiga inverkan på geokemiska förhållanden. Data från grundvattenkemimoniteringen utgör också indata till Task 5 som genomförs inom ramen för Task Force (se nedan). En mindre utvidgning av provtagningsprogrammet har gjorts under 1998 för att även få provtagningspunkter från tunnelns nedre delar.

### **SKB:s geodatabas – SICADA**

SKB har genomfört geologiska undersökningar sedan slutet av 70-talet. Data från SKB:s undersökningar inklusive de mätningar som utförts vid Äspölaboratoriet finns lagrade i SKB:s geodatabas SICADA. Hantering och förvaltning av undersökningsdata är en krävande uppgift. Säkerhetsanalyser måste baseras på korrekta och relevanta data. Detta betyder att rutiner för datahantering skall utformas så att de fyller kraven på spårbarhet, tillgänglighet, datasäkerhet, användarvänlighet och effektivitet.

Målet för förvaltningen och vidareutvecklingen av SICADA är att databasen skall vara ett effektivt verktyg för kommande platsundersökningar och experiment som genomförs vid Äspölaboratoriet. Systemet skall hållas modernt och utvecklas i takt med platsundersökningsprogrammet.

### **Arbetsgrupp för modellering (Task Force)**

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 syftet är att utvärdera tillämpligheten av olika modeller. Arbetsgruppen skall utgöra ett forum för samverkan och diskussion om konceptuell och numerisk modellering av grundvattenflöde och transport av radionuklider för de organisationer som deltar i Äspösamarbetet. Gruppen möts två gånger om året. I arbetsgruppen knyts modelleringsarbetet till pågående och kommande experiment vid Äspölaboratoriet vilket medför att experimenten kan planeras och utvärderas bättre. Arbetet bedrivs i huvudsak genom att flera modelleringsgrupper arbetar med samma arbetsuppgift (Task). Uppgifterna definieras därför på ett sådant sätt att en jämförelse mellan modellerna skall vara möjlig. Resultaten utvärderas sedan av deltagare från de internationella organisationer som deltar i Äspölaboratoriet. Vid utvärderingen betonas de lärdomar som kan dras för kommande platsundersökningar och säkerhetsanalyser. Arbetsuppgifterna har hittills omfattat

- Task 1:** Modellering av LPT-2, ett storskaligt långtidspumptest och därtill hörande spår försök /14-21/.
- Task 2:** Designberäkningar för planerade spår försök i detaljskala /14-33, 14-34, 14-35, 14-36, 14-37/.
- Task 3:** Modellering av den hydrauliska påverkan av Äspötunneln /14-22/.
- Task 4:** Prediktiv modellering av spår försök med sorberande och icke-sorberande spårämnen genomförda inom TRUE-1 projektet /14-38, 14-39/.
- Task 5:** Koppling mellan hydrogeologiska och hydrokemiska modeller /14-40/.



Task 1-3 är avslutade medan Task 4-5 kommer att pågå ytterligare några år. Arbetet inom Task force-gruppen kommer att fortsätta under perioden. Nya arbetsuppgifter (tasks) kommer successivt att definieras i samarbete med de utländska organisationer som deltar arbetsgruppen.

#### **14.4.3 Fastställa detaljundersökningsmetodik**

Detaljundersökningar omfattar byggande av en tillfartstunnel eller schakt till djupförvarsnivå och genomförande av undersökningar från tunnlar eller borrhål borrade från tunnlar. Detaljundersökningar för ett djupförvar av använt kärnbränsle syftar till att

- bekräfta att en lämplig förvarsvolym finns tillgänglig,
- ge tillräckligt underlag för den säkerhetsanalys som behövs för att erhålla tillstånd för utbyggnad av ett djupförvar, samt
- ge data så att förvarssystemet kan optimeras med hänsyn till tekniska barriärer och geometrisk utformning.

Inom ramen för etappmålet genomförs detaljerade undersökningar av den störda zonen runt sprängda och borrade tunnlar, utvecklas interaktiva datorsystem för tolkning av mätdata och design av förvaret samt instrument för undersökningar under jord.

#### ***Rock Visualization System***

Uppbyggnad av en bergmodell för en plats sker successivt genom insamling och bearbetning av data. Dessa data kommer att samlas i SKB:s geodatabas, SICADA. Dessutom kommer geologiskt och geofysiskt kartmaterial att vara samlat i SKB:s GIS-system. Erfarenheterna från undersökningarna vid Äspölaboratoriet visar att det under karakteriseringen av en plats är viktigt att ha tillgång till ett interaktivt 3D CAD-system som möjliggör att i 3D pröva olika möjliga samband av observationer i borrhål och på marken under arbetet med att bygga en modell av bergets struktur. En snabb visualisering av strukturmodellen gör det möjligt att utifrån befintlig information kunna optimera fortsatta undersökningar. I projekteringen av ett djupförvar kommer 3D modellen av berget att utnyttjas för att optimalt anpassa anläggningens utformning (layout) till bergets geometriska struktur. Då flera olika grupper kommer att arbeta med data från en platsundersökning är det viktigt med ett gemensamt 3D CAD-system där alla data kan behandlas och visualiseras.

För att möta dessa krav påbörjade SKB i slutet av 1994 framtagandet av det interaktiva 3D CAD-verktyget Rock Visualization System (RVS). Version 1 av systemet levererades till SKB under 1997. Systemet har sedan successivt börjat utnyttjas inom de forskningsprojekt som bedrivs vid Äspölaboratoriet.

#### **Mål och utförande**

Målet är att utveckla ett avancerat och användarvänligt visualiserings- och modelleringsverktyg baserat på ett kommersiellt tillgängligt CAD-system samt att systemet är väl integrerat med SKB:s databas SICADA /14-8/.

RVS är en programvarutillämpning till det kommersiellt tillgängliga 3D CAD-verktyget MicroStation 95 som kan köras under de vanliga förekommande operativsystemen. RVS

version 1.0 är utformat som ett en-användarsystem och datautbytet mellan RVS och SKB:s databas SICADA är baserat på client/server teknik. I RVS är inte arbetet baserat på designfiler och nivåer som i vanliga CAD-system utan på projekt och objekt /14-8/. RVS-systemet innehåller moduler för visualisering av borrhål och resultat från mätningar i borrhål, modellering, design av tunnlar, animering samt framtagning av ritningar. Baserat på erfarenheter av ungefär ett års drift av systemet och de behov av kompletteringar som identifierats av användarna kommer en Version 2 av RVS att tas fram. Tillämpningen av systemet inom Äspölaboratoriets projekt kommer att leda till krav på förändringar och nya funktioner i systemet.

### ***Test och vidareutveckling av undersökningsmetodik för detaljundersökningar***

Ett program för detaljundersökningar kommer att utarbetas innan detaljundersökning inleds på en vald plats och bygget av djupförvarets ovan- och underjordsdelar påbörjas. I samband med drivningen av Äspötunneln har flera olika undersökningsmetoder prövats och utvärdering av dessa metoders användbarhet i samband med detaljundersökning för ett djupförvar pågår. De preliminära erfarenheterna från Äspö visar att det finns ett behov för vidareutveckling av vissa metoder för att öka kvaliteten på insamlade data, öka effektiviteten samt att förbättra tillförlitligheten i en krävande underjordsmiljö. Dessutom behöver detaljundersökningsprogrammet utformas så att en god samordning erhålls mellan bergundersökningar och byggverksamhet.

#### **Mål och genomförda arbeten**

Målsättningen är:

- att prova befintliga och nya metoder där oklarhet råder beträffande metodernas användbarhet för detaljundersökningar. De metoder som skall testas väljs utifrån deras potentiella användning inom detaljundersökningsprogrammet,
- att vidareutveckla viktiga metoder i ett detaljundersökningsprogram för att öka datakvalitet, effektivitet och tillförlitlighet.

Vissa metoder har provats inom ramen för andra projekt inom Äspölaboratoriet. Så har till exempel radar och seismik provats i samband med de karakteriseringsarbeten som genomförts för Prototypförvarsprojektet och prov av olika återfyllnadsmaterial /14-41/. Kontroll av tillförlitligheten hos bergspänningsmätningar genomförda med överborrningsmetoden har genomförts /14-42/. Laserscanning har prövats som teknik för dokumentation av tunnlar, både med avseende på deras geometriska dimension samt som underlag för geologisk kartering /14-43/.

#### **Planerade arbeten**

Ytterligare prov av metoder för detaljundersökningar avses i huvudsak bli utförda inom ramen för pågående projekt. När erforderligt underlag finns tillgängligt kommer utvärderingsrapporter att sammanställas som sammanfattar hittills vunna erfarenheter samt ger rekommendationer för eventuell vidareutveckling av lämpliga metoder. Metoder där vissa prov redan gjorts och där utvärdering beräknas ske under den kommande programperioden är mätning av maskinparametrar under borrning för att erhålla geologisk information, vattenprovtagning under borrning för att få ostörda prov, högupplösande seismik och radar

samt metoder för noggrann inmätning av borrhål. Framtagning av ett nytt system för tunnelkartering kommer att inledas under perioden.

#### **14.4.4 Test av modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion**

Berget som omger förvaret utgör en naturlig barriär mot utsläpp av radionuklider till biosfären. Bergets viktigaste funktioner är att skydda de tekniska barriärerna genom att säkra långsiktigt stabila kemiska och mekaniska förhållanden samt begränsa transport av korroderande och av radioaktiva ämnen genom en långsam och stabil grundvattenomsättning. I säkerhetsanalyser beskrivs bergets barriärfunktion med olika modeller.

Inom ramen för detta etappmål genomförs projekt med syfte att utvärdera användbarhet och tillförlitlighet hos olika modeller samt att utveckla och pröva metoder för bestämning av parametrar som ingår i modellerna. En viktig del av detta arbete utförs i Äspö-laboratoriets internationella arbetsgrupp för modellering (Äspö Task Force on Groundwater Flow and Transport of Solutes, se även 14.4.2). Studier genomförs även av den störning som byggande och drift av ett förvar innebär för att säkerställa att störningen inte har en negativ inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet.

#### ***Tracer Retention Understanding Experiments – TRUE***

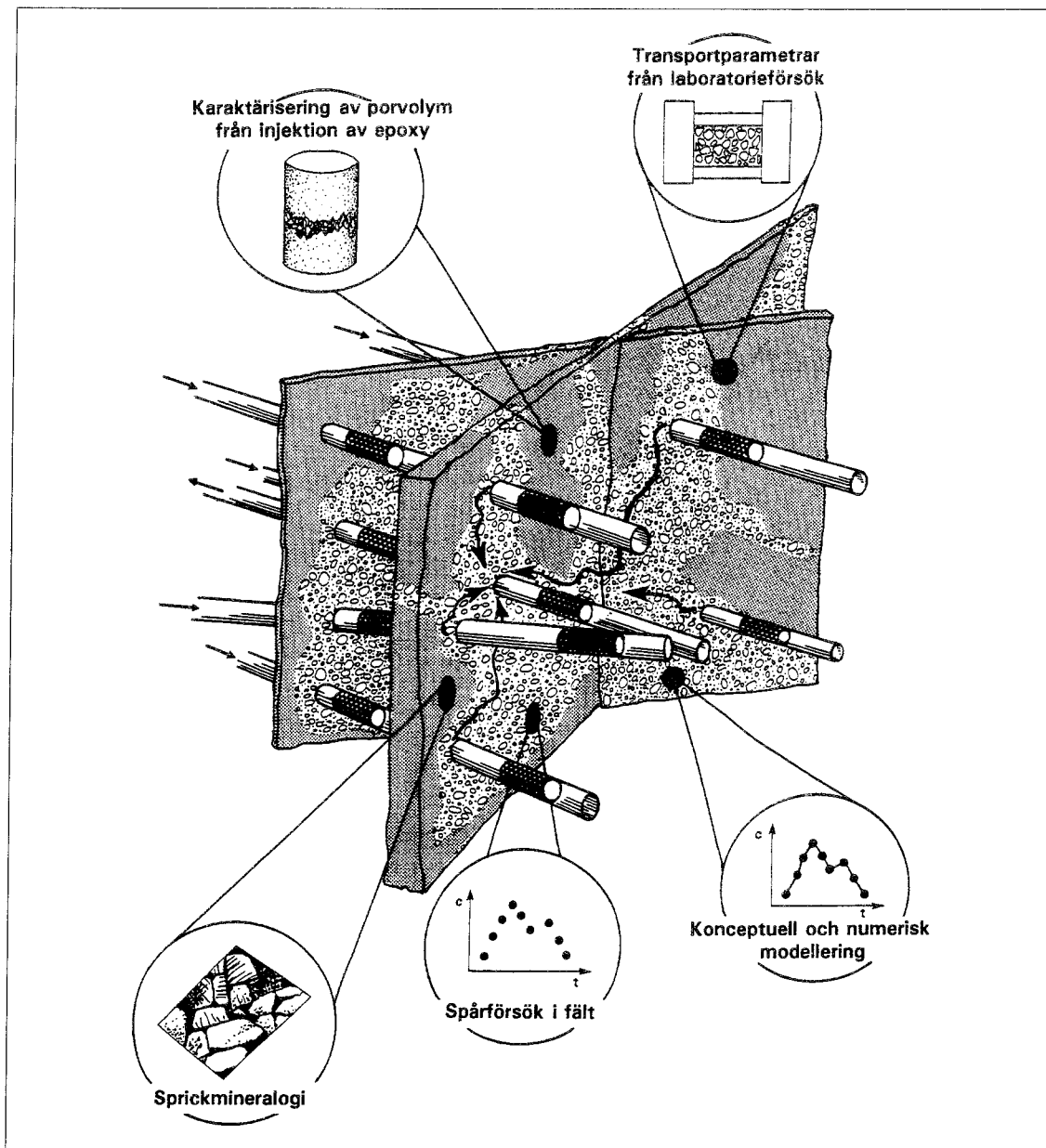
Berget utgör en barriär som begränsar transport av olika ämnen. För de flesta ämnen lösta i vatten sker transporten av ämnet långsammare än grundvattnets genomsnittliga flödes-hastighet. Detta beror på ett flertal olika processer som ger upphov till en uppbromsning av de lösta ämnena relativt det strömmande grundvattnet. Viktiga processer är dispersion och retention. Retentionen (uppbromsningen) orsakas av följande mekanismer:

- Radionuklider sorberar på mineralytor där grundvattnet rör sig.
- Radionuklider diffunderar ut från vattenförande sprickor till det stagnanta vattnet i makro- och mikroporer i berget, och sorberas på mineralytorna där.

Även icke-sorberande ämnen fördröjs genom att de uppehåller sig i det stagnanta vattnet i mikroporerna och på så vis undandras transporten i det flödande vattnet i vattenförande sprickor. Radionuklidretention enligt detta mönster är väsentlig och refereras ofta till som "matrisdiffusion".

För att utveckla förståelsen av radionuklidretention i berget, samt skapa förtroende för att de radionuklidtransportmodeller som avses bli använda i licensieringen av ett djupförvar för använt bränsle är realistiska, har ett program för spår försök i olika skalor utformats. Programmet som givits namnet Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE) utarbetades 1994 /14-44/.

Grundidén är att genomföra en serie spår försök med gradvis ökande komplexitet. I princip kommer varje spår försök att innehålla en serie aktiviteter som inleds med geologisk karakterisering av försöksområdet, följt av hydrauliska försök och spårämnesförsök. Avslutningsvis kommer epoxy eller något liknande ämne att injiceras, försöksvolymen att brytas ut och bergproverna att analyseras med avseende på flödesvägar och spårämneskoncentration. Geologisk karakterisering, laborieförsök och modellering ingår som integrerade delar av projektet (Figur 14-8). Den första försökscykeln (TRUE-1) som genomförts i liten skala, har begränsad tidsutsträckning och har främst riktats in mot teknikutveckling. Därpå följande försök kommer att pågå under längre tid för att kunna



Figur 14-8. Principskiss för TRUE-försöket.

studera olika retentionsmekanismer. Spårämnesförsök i både blockskala (10–100 m) och detaljskala (1–10 m) kommer att genomföras. Detta ger en grund för att förstå skalningsrelationer samt att pröva modeller för radionuklidtransport i 50 m skala.

Experimentprogrammet är utformat för att ta fram data för konceptuell och numerisk modellering med regelbundna intervall. Regelbunden utvärdering av försöksresultaten kommer att ge en grund för planering av följande försökscykler. Detta borde ge en nära integration mellan experiment- och modellarbete. Detaljerade planer för spårförsöken utarbetas successivt under programmets gång.

## Mål och genomförda arbeten

Målen för TRUE-programmet är

- att fördjupa kunskaperna om radionuklidtransport och retention i sprickigt berg,
- att utvärdera användbarhet och tillförlitlighet för olika modellansatser,
- att utveckla och pröva metoder för att bestämma viktiga transportparametrar, samt
- att bestämma värden på viktiga transportparametrar in-situ.

Den första etappen av TRUE-försöken (TRUE-1) inleddes under 1994 och beräknas vara slutförd i slutet av 1998. Den första etappen är framför allt inriktad på utveckling av teknik för spår-försök i detaljskala och för karakterisering av porvolymen genom injicering av epoxy samt utveckling av svagt sorberande spårämnen /14-45/.

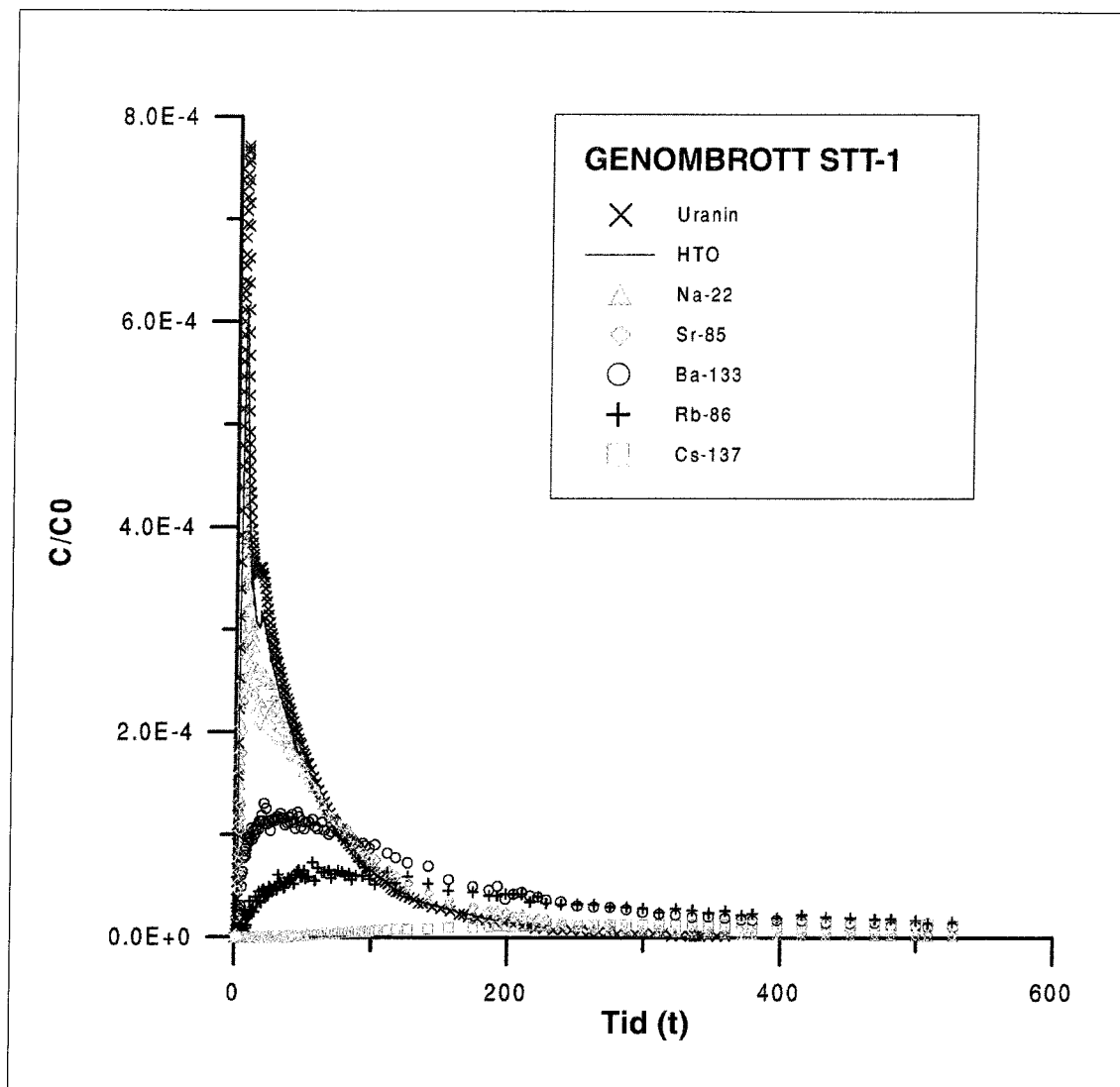
TRUE-1 försöket omfattar spår-försök i en spricka över avstånd på 5–10 m på cirka 400 m djup. Undersökningar av berget för val av en lämplig plats för genomförande av försöket inleddes 1994. I början av 1995 valdes ett område på cirka 400 m djup för genomförande av försöken /14-46/. En försöksnisch etablerades och därifrån borrades fyra hål och mätningar genomfördes i dessa för att karakterisera försöksvolymen. En spricka på ca 15 m avstånd från försöksnischen identifierades som lämplig. Under 1996 genomfördes flera försök med icke-sorberande spårämnen i den utvalda sprickan /14-47, 14-48, 14-49, 14-50/.

Erfarenheterna från försöket har visat att de experimentella förberedelserna i form av identifiering och karakterisering av lämpliga försöksvolymen är mer resurs- och tidskrävande än ursprungligen beräknat. Då försöksförhållandena i den valda försöksvolymen bedömdes som goda togs beslutet att komplettera programmet och inkludera försök med sorberande spårämnen i TRUE-1 projektet vilket inte var planerat från början /14-51/. Experimentvolymen kommer dessutom att utnyttjas för ytterligare spår-försök innan någon form av förstörande provning, såsom injicering av epoxy, genomförs.

Det första försöket med sorberande radioaktiva spårämnen inleddes i juli 1997 och avslutades i början av mars 1998. Experimentet omfattade injicering av två icke sorberande (Uranin and HTO) och sex svagt till måttligt sorberande spårämnen ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{47}\text{Ca}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ). Resultaten visar på relativa fördröjningar av spårämnesgenombrotten som i huvudsak stämmer med de värden på sorptionskoefficienterna som bestämts i laboratoriet. Uranin och tritierat vatten (HTO) har ungefär samma genombrotts-tid. Därefter följer i ordning  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{47}\text{Ca}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  (Figur 14-9). En preliminär tolkning av resultaten visar på att sorptionen av cesium är icke-reversibel, dvs att 60–65 % av den injicerade mängden cesium skulle fastnat i berget. /14-8/.

Försöket har genomförts i nära samarbete med Äspölaboratoriets Task Force som löpande fått del av försökets resultat för tillämpning i olika transportmodeller. För att utvärdera tillförlitligheten hos modeller och underliggande data har modellörerna fått i uppgift att göra prediktioner av de experimentella resultaten innan experimenten genomförts /14-52, 14-53, 14-54/. Modellörerna har även givits möjlighet att påverka utformningen av försöken. Detta har borgat för det nära samarbete mellan experimenterare och modellörer som behövs för att vidareutveckla modeller på detta område.

Parallellt med fältförsöken har omfattande laboratorieförsök gjorts för att studera diffusion och sorption av svagt sorberande ämnen på bergprover från Äspö. Försöken visar att Äspödioriten har en heterogen porositetsfördelning som hänger nära ihop med mineral-



*Figur14-9. Genombrottskurvor från ett försök med sorberande spårämnen som genomförts inom TRUE-1 projektet.*

fördelningen. Försöken har visat att korngränser inte utgör migrationsvägar i diorit-matrisen. Nätverket i vilket migration sker består av en komplex blandning av mineral som domineras av biotit, plagioklas och klorit, alla med små kornstorlekar (<0.5 mm). Kvarts och större fältspatkorn bedöms som icke porösa. Resultaten visar att sorptionen sker i de porösa mineralen. Uppskattningsvis en storleksordning lägre  $K_d$ -värden erhöles vid diffusionsexperimenten jämfört med batch experiment utförda på krossat berg. Detta beror troligen på att krossningen skapar större porositet och ökad sorptionsyta. Irreversibel sorption har observerats för flera av de testade radionukliderna. En ansenlig del av massan kan enligt batchförsöken sorberas irreversibelt och skulle således ej transporteras genom berget. /14-8, 14-55/.

Ett pilotförsök har genomförts för att utveckla en teknik för att verifiera transportvägar i en verklig spricka. Försöket har genomförts i en spricka som skär en ort på 450 m djup /14-56/. Epoxy har injicerats i spricka som därefter har provtagits genom borrhning.

Proverna har sedan sågats upp och sprickvidden mätts längs ett tätt nätverk av profiler. Två olika tekniker för att mäta sprickvidden har använts /14-8/.

### Planerade arbeten

Etapp 2 av spår försöken i detaljskala (TRUE-2) inleds under 1998 /14-57/. Denna etapp fokuseras på retentionsprocesser i en enskild spricka och hur de kan observeras och särskiljas i fältförsök. Försöken kommer att pågå under längre tid än TRUE-1 så att processer som diffusion till porer med stagnant vatten och eventuellt även matrisdiffusion blir mätbara processer. En huvuduppgift under projektets inledningskede blir att identifiera och karakterisera ytterligare en enskild spricka att genomföra försöken i. Inom ramen för TRUE-2 kommer även ytterligare försök med sorberande spårämnen att genomföras i den spricka som använts för TRUE-1 försöken. Laboratieförsök genomförs för att studera hur diffusion och sorption påverkas av bergets mikrostruktur.

Under 1996 inleddes planering och genomförande av ett spår försök i blockskala (10–100 m), det så kallade TRUE Block Scale försöket /14-58/. Projektet genomförs som ett internationellt samarbetsprojekt inom Äspölaboratoriet med deltagande av ANDRA, ENRESA, PNC, Posiva, UK Nirex och SKB. Målet med detta projekt är

- att öka förståelsen av och förmågan att prediktera spårämnestransport i ett nätverk av sprickor,
- att utvärdera betydelsen av olika retentionsmekanismer i ett nätverk av sprickor, samt
- att utvärdera sambandet mellan flöde- och transportdata som ett verktyg för att modellera transportprocesser.

Försöket inleddes under 1996 med karakterisering av försöksvolymen som är belägen på 450–500 m djup ca 100 m söder om TBM-tunneln i den sydvästra delen av laboratoriet (Figur 14-7). Beskrivningen av berget och dess hydrauliska egenskaper görs dels i form av en deterministisk modell över identifierade strukturer (mindre sprickzoner), i allmänhet med en utsträckning av mer än ca 50 m, och dels i form av en stokastisk nätverksmodell som beskriver de mindre sprickorna. Uppdatering av modellerna sker successivt genom en iterativ process där information från nya borrhål efterhand inkluderas i modellerna /14-8/. Spår försök med icke-sorberande spårämnen påbörjas under 1998. Projektet beräknas vara avslutat i och med utgången av år 2000.

### ***Långtidsprov av diffusion i bergmatrisen***

Transport av radionuklider genom bergets sprickor studeras i huvudsak inom ramen för TRUE-programmet. Studier av matrisdiffusion, vilket är en viktig retentionsprocess, kräver emellertid ett annorlunda experimentellt utförande. Matrisdiffusion är en långsam process som det är svårt att studera inom de tidsramar som lagts fast för TRUE-projekten.

Matrisdiffusion har studerats i många laboratieförsök. Det är dock svårt att i ett laboratorium reproducera vissa experimentparametrar såsom naturlig grundvattensammansättning, tryck och en ostörd bergmatris. Prov som tas ut för laboratieförsök kan vara skadade på grund av borrhningen och den spänningsavlastning som sker i samband med provtagningen. Det är därför viktigt att verifiera resultat från hittills genomförda laboratieförsök genom studier av matrisdiffusion i ostört berg.

## Mål och utförande

Målet med in-situ studierna av matrisdiffusion är

- att undersöka diffusion av radionuklider i en ostörd bergmatris som inte spänningsavlastats under naturliga förhållanden avseende grundvattentryck och sammansättning,
- att erhålla data på sorptionsegenskaper för några radionuklider från ostörd bergmatris och färsk bergytta under naturliga förhållanden, samt
- att jämföra sorptionsdata erhållna från laboratorieförsök med data erhållna under naturliga förhållanden.

Försöket genomförs i ett borrhål som utförts så att skadan på omgivande berg blir liten. Hålet försluts med en manschett och grundvatten cirkuleras i den avtätade sektionen medelst en pump placerad i botten av hålet. När grundvattnets kemiska sammansättning stabiliserats injiceras radionuklider i borrhålet. Dessa kommer då att diffundera ut i berget som omger hålet. Ämnen med låg diffusivitet injiceras före ämnen med högre diffusivitet för att de radioaktiva ämnena skall hållas inom ett bestämt avstånd från hålet. Experimentet avslutas genom att provhålet överborras och bergproverna analyseras med avseende på förekomst och fördelning av de injicerade radionukliderna. Fältförsöket beräknas pågå i ca 5 år.

## **Radionuklidretention**

De flesta radionuklider har en stark affinitet för att fastna på olika ytor, dvs ett högt  $K_d$ -värde. Via laboratoriemätningar har man kommit fram till siffervärden som kan användas i säkerhetsanalyserna. Det är emellertid svårt att i laboratoriet efterlikna de naturliga grundvattenförhållandena i berget, t ex vad avser redoxstatus, halter av kolloider, lösta gaser och organiskt material. Det är följaktligen svårt att få fram säkra värden från laboratoriet på t ex upplösning eller retention av radionuklider i de fall där de är starkt beroende av grundvattnets egenskaper.

## Mål och genomförda arbeten

Målen för undersökningarna är att

- validera modeller och kontrollera konstanter som används för att beskriva radionuklidens upplösning i grundvatten, inverkan av radiolys, bränslekorrosion, sorption på mineralytta, diffusion i bergmatrisen, diffusion i återfyllnadsmaterial, uttransport ur en skadad kapsel och transport i en enskild bergspricka,
- speciellt pröva inverkan av naturliga reducerande förhållanden på löslighet och sorption av radionuklider,
- pröva grundvattnets förmåga att ta upp och transportera radionuklider med naturliga kolloider, humusämnen och fulvosyror.

För att genomföra de verifierande försöken under naturliga förhållanden så har en borrhålssond, CHEMLAB, konstruerats. Konstruktionsarbetet med CHEMLAB-sonden påbörjades redan 1991 och sonden levererades till Äspölaboratoriet 1996. CHEMLAB-sonden är ett kemiskt laboratorium som byggts in i en borrhålssond i vilket experiment



kan genomföras under naturliga förhållanden vad avser grundvattnets temperatur, tryck och sammansättning. Försök kan också genomföras med radioaktiva ämnen utan risk för kontamination av omgivande berg och grundvatten. Principerna för sondens konstruktion visas i Figur 14-10. Olika typer av mätningar beräknas pågå cirka 5 år framöver. Innan in-situ försöken genomförs i CHEMLAB-sonden prövas försöksupställningarna i ett normalt laboratorium.

Försöken med diffusion av radionuklider i MX80 bentonit inleddes 1997 och har genomförts för följande nuklider  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$  och  $^{99}\text{Tc}$ . Figur 14-11 visar resultatet från ett försök med diffusion av cesium genom bentonit. Överensstämmelse mellan det förväntade och det faktiskt erhållna resultatet får betraktas som god. Under 1997 kompletterades CHEMLAB-sonden med ett datasystem för automatisk styrning av experimenten.

### Planerade arbeten

Kommande experiment planerade för CHEMLAB-sonden omfattar migration av redoxkänsliga nuklider, löslighet, desorption, migration från buffert till berg (s k filmmotstånd), radiolys och upplösning av använt bränsle. Ett preliminärt program för utformning av de olika experimenten har tagits fram /14-59/. Detaljprogram för de experiment som skall genomföras kommer att utarbetas successivt.

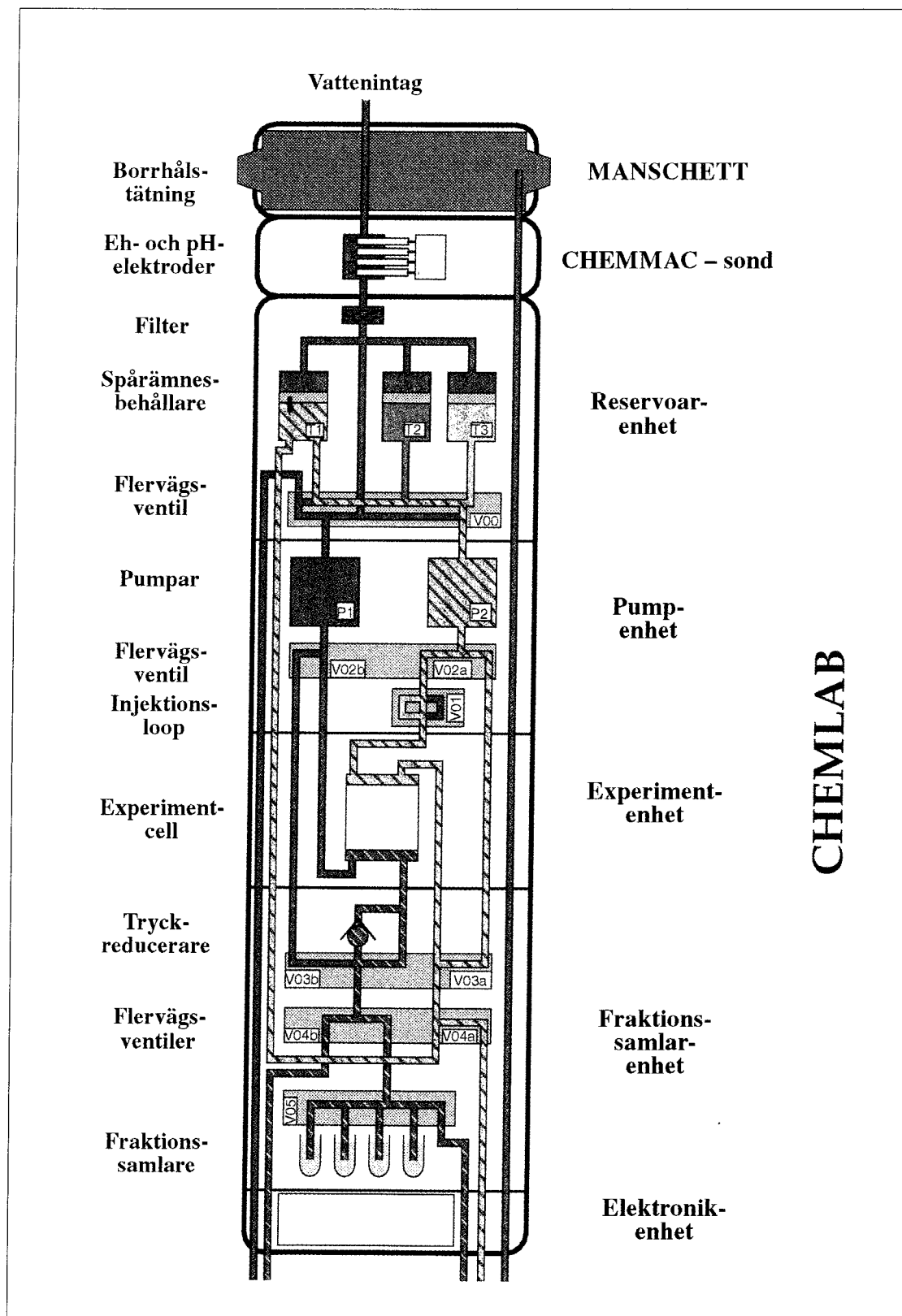
Radiolysexperiment med Tc påbörjas under 1998 och beräknas pågå till slutet av 1999. I detta experiment simuleras effekten av att strålningen från bränslet sönderdelar vattenmolekylerna (radiolys). Då bildas bland annat olika ämnen som kan oxidera de redoxkänsliga nukliderna till former där de är mer lösliga och mer rörliga än i reducerad form. Två olika typer av radiolysexperiment planeras. Fyrvärd teknetium kommer att användas i bägge experimenten.

Transporten av nuklider från bentonitbarriären ut till en vattenförande spricka skall studeras i ett experiment där Sr, Cs och I används som nuklider. Experimentet genomförs för att verifiera teoretiska beräkningar som visat att övergångsmotståndet mellan bentonit och vatten är en väsentlig fördröjningsmekanism. Motivet till att välja dessa nuklider är att de har olika diffusivitet i bentonit. Experimentet beräknas pågå i fem månader och genomföras under senare halvan av 1999 och första halvan av år 2000.

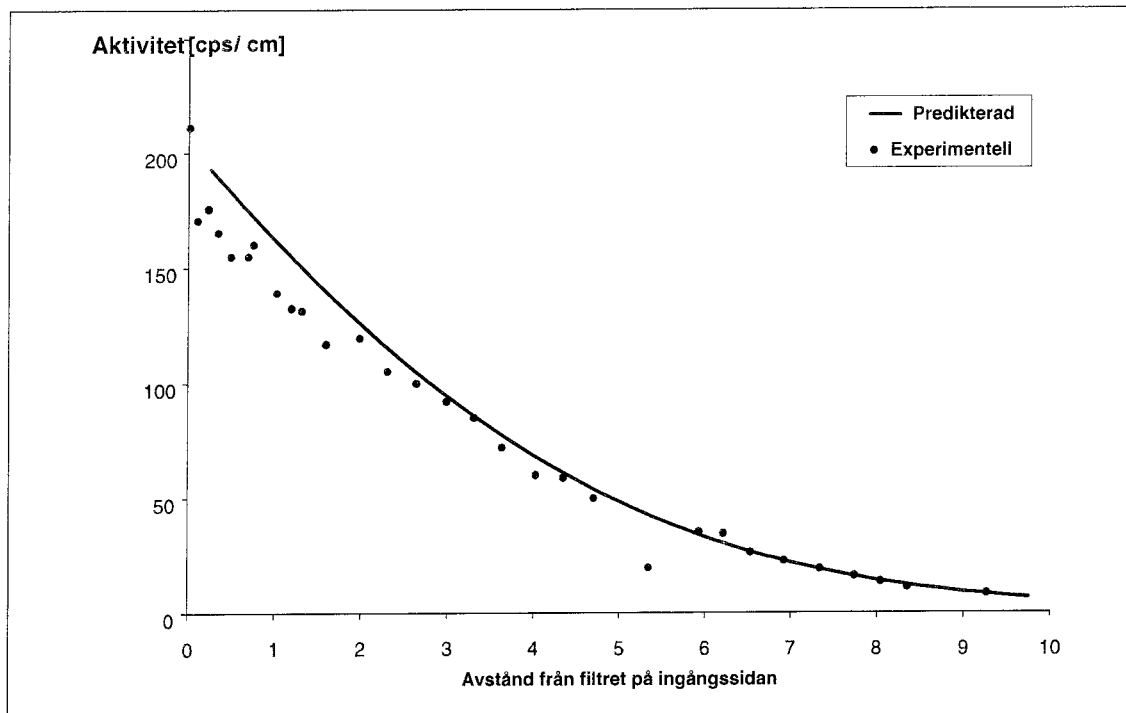
Reversibilitet för sorption, dvs förmågan för radionuklider som sorberats på bergytter att frigöras igen, kommer att studeras i ett experiment. I experimentet används nukliderna Tc, Sr och Cs. Experimentet beräknas ta drygt ett halvt år att genomföra.

Lösligheten och sorptionen påverkas av vattnets kemiska sammansättning. Speciellt betydelsefullt är, förutom redoxförhållandena, halter av kolloider och mikrober som båda kan fungera som bärare för radionuklider. Halterna är ofta låga och svåra att bestämma. Genom direkta löslighets- och sorptionsexperiment kan man mäta deras effekt. I förhållande till övriga tidigare beskrivna experiment har dessa en lägre prioritet och planeras därför sist i sekvensen med start tidigast år 2001.

Ett experiment med redoxkänsliga nuklider beräknas pågå under hela 1999 och halva 2000. Genom samarbete med Institut für Nukleare Entsorgung (som arbetar för BMBF) i Tyskland planeras även försök med Americium, Neptunium och Plutonium. En naturlig spricka har borrats ut i Äspötunneln. Denna kommer att delas och användas för de olika experiment som genomförs. Prov med Tc(VII) och U(VI) planeras genomföras i en naturlig utbördad spricka. Dessa experiment kombinerat med bestämning av lösligheter



Figur14-10. Schematisk bild över CHEMLAB-sondens konstruktion.



Figur 14-11. Resultat från mätning av diffusion av cesium i bentonit.

för Tc(IV) och U(IV) beräknas ta tio månader. Experimentet med Americium, Plutonium och Teknetium antas kräva motsvarande tid.

Experiment med använt bränsle kommer att kräva omsorgsfull radiologisk kontroll på förberedelser, genomförande och tillhörande transporter. Den exakta tidsåtgången kan inte beräknas förrän dessa frågor har utretts. Det är rimligt att anta en experimenttid av 3-5 år. Målet är att kunna påbörja experimenten med använt bränsle under år 2000.

För att kunna genomföra det planerade experimentprogrammet inom den planerade tiden erfordras ytterligare en borrhålls sond. En förenklad version av den befintliga CHEMLAB-sonden tillverkas under 1998. Den nya sonden kommer inledningsvis att användas för migrationsförsöken av redoxkänsliga nuklider med beräknad start under 1999.

### Hydrokemisk stabilitet

Grundvattnets kemiska egenskaper är av betydelse för olika förvarskomponenters beständighet samt radionuklidens löslighet och transportegenskaper. Platsen för djupförvaret kommer att väljas där de geokemiska förhållandena på förvarsdjup är gynnsamma. Det är därför viktigt att visa att dagens gynnsamma förhållanden inte kommer att ändras väsentligt i framtiden. Grunden för förståelse av den framtida utvecklingen av de geokemiska förhållandena på en förvarsplats ligger i en god förståelse av den utveckling som lett till nuvarande tillstånd. Viktiga verktyg för denna förståelse är hydrogeologiska och hydrokemiska modeller.

## Mål och utförande

Det övergripande målet är att öka förståelsen för de förändringar i rådande grundvattensystem som kan tänkas ske i framtiden (upp till 100 000 år) samt att utveckla metodik för integrerad hydrokemisk modellering.

Modelleringsarbetet genomförs av modellgrupper som arbetar för de organisationer som deltar i Äspöprojektet. Arbetet utförs på undersökningsdata som i huvudsak insamlats under förundersökningsfasen. Avrapporteringen har gjorts vid arbetsmöten i juni 1994 /14-60/, 1995 /14-61/ och 1997 /14-62/.

Arbetet genomförs nu i huvudsak inom ramen för Task Force arbetet. Den så kallade Task 5 har satts upp för att utvärdera och förbättra konsistensen mellan de hydrokemiska och de hydrogeologiska modellerna. Målen för denna modelleringsuppgift har definierats enligt följande:

- att utvärdera samstämmigheten mellan grundvattenflödesmodeller och geokemiska blandningsmodeller genom integration och jämförelse mellan hydrauliska och kemiska data erhållna före och under drivningen av tunneln på Äspö, samt
- att utveckla en metodik för att integrera hydrogeologisk och geokemisk information som kan användas vid utvärderingen av möjliga förvarsplatser.

I detta fall kan överensstämmelsen mellan de hydrogeologiska och de geokemiska modellerna kontrolleras gentemot den förändring i flödesvägar och grundvattenkemi som byggandet av Äspölaboratoriet gett upphov till.

Inom ramen för projekt Hydrokemisk stabilitet genomförs även SKB:s deltagande i EU-projektet EQUIP (Evidences from Quaternary Infillings for Palaeohydrology). EQUIP syftar till att via sprickmineralundersökningar härleda tidigare rådande hydrokemiska förhållanden. I EQUIP deltar ANDRA, ENRESA, Nirex, Posiva och SKB. Projektet startade 1997 och förväntas pågå i 3 år.

Ett annat arbete med målet att utreda grundvattnets ursprung innefattar provtagning och analys av vatten i de mikrosprickor som finns i bergmatrisen. En speciell utrustning utvecklas för detta ändamål under 1998. Provtagning kommer att ske i ett särskilt hål borrat för ändamålet. Syftet med studien är att klargöra om mycket salt vatten har förekommit på platsen under tidigare skeden. Genom olika mätningar och beräkningar kan man (eventuellt) avgöra om saltet i vattnet härrör från berget eller om det har ett annat ursprung, se avsnitt 9.6.

## ***Tvåfasflöde***

Omättat eller två-fas flöde, dvs samtidigt flöde av gas och vatten, kan uppstå i ett djupförvar på grund av 1) frigörelse av i grundvattnet naturligt förekommande lösta gaser vid de låga tryck som uppkommer i närheten av dränerade tunnlar, 2) penetration av gas (luft och spränggaser) in i berget under byggnation och från ventilerade tunnlar eller från buffert och återfyllnadsmaterial 3) penetration av gas producerad på grund av korrosion eller biologiska processer samt 4) radioaktiva gaser som bildas vid radioaktivt sönderfall av det använda bränslet.

Studier har hittills genomförts av effekten av att i grundvattnet lösta gaser frigörs vid låga tryck, se avsnitt 14.3.3 ovan. Det kommande arbetet inriktas mot att studera transporten

av gas som producerats genom korrosion eller biologiska processer. Detta är av betydelse framför allt för annat avfall som innehåller relativt stora mängder korrosivt material. Gasproduktion på grund av korrosion kan även ske av koppar/stålkapseln om det gått hål på kopparhöljet. Korrosion av stålinsatsen kommer då att ge upphov till vätgas. Det är i dessa sammanhang viktigt att förstå hur gasen kommer att transporteras från förvaret. /14-63/.

## Mål och utförande

Målet är att utveckla och prova modeller för tvåfasflöde genom sprickigt berg.

Projektet genomförs som ett samarbetsprojekt med BMBF, Tyskland. BMBF svarar för genomförandet av fältförsöken i Äspölaboratoriet samt genomför utveckling av tredimensionella numeriska modeller.

Försöken genomförs i en nisch på 360 m djup i Äspölaboratoriet där en vertikal spricka identifierats och befunnits lämplig för genomförande av försöken. Geologisk och hydrogeologisk karakterisering av sprickan har genomförts. Transporten av gas och vatten i sprickan kommer sedan att undersökas med olika försök. SKB:s insatser inriktas i huvudsak mot modellutveckling, analys av resultat från fältförsöken samt genomförande av vissa laboratorieexperiment.

### 14.4.5 Demonstration av teknik för och funktion hos viktiga delar i förvarssystemet

Anläggningen av Äspölaboratoriet har givit värdefulla erfarenheter vad avser vidareutveckling och prov av teknik för byggande av ett förvar och undersökning av berget i samband med byggandet. Detta är viktiga erfarenheter som behövs inför detaljundersökning av en plats. Genom att tunneldrivning utförts både med konventionell sprängning och borrhning och med en tunnelborrningsmaskin (TBM) har ett värdefullt underlag för val av brytningsmetodik i djupförvaret erhållits.

Äspölaboratoriet ger möjlighet att i full skala och under realistiska förhållanden pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter i djupförvarssystemet som har betydelse för långtidssäkerheten. Det är också viktigt att visa att hög kvalitet kan erhållas i utformning, byggande och drift av ett djupförvar. Inom ramen för etappmålet kommer en fullskaleprototyp av djupförvaret att byggas för att simulera förvarets funktion och samverkan mellan dess delar under det inledande skedet efter förslutning. Demonstration av deponeringsteknik görs för att utveckla teknik och prova olika steg i deponeringssekvensen. Olika återfyllnadsmaterial och teknik för återfyllnad av tunnlar provas i ett särskilt experiment. Dessutom genomförs detaljerade undersökningar av samverkan mellan de tekniska barriärerna och berget, i vissa fall under långa tider.

### **Prototypförvar**

Olika aspekter av förvarskonceptet har provats i flera fält- och laboratorieförsök. Modeller har utvecklats som beskriver och förutsäger funktionen hos förvarets komponenter och systemet i sin helhet. Det finns dock ett behov av att prova och demonstrera genomförandet av deponeringssekvensen med dagens teknik i full skala samt att demonstrera att det är möjligt att förstå de processer som är av betydelse i de olika ingenjörbarriärerna och det omgivande berget.

Idéerna om att bygga ett prototypförvar i Äspölaboratoriet har utvecklats under en lång tid. Prototypförvarets roll har successivt klarlagts i relation till de andra storskaliga experiment som genomförs i Äspölaboratoriet och utvecklingen av djupförvarsprogrammet. Resultatet är att prototypförvars projektet fokuseras mot prov och demonstration av förvarssystemets funktion. Vissa aktiviteter som syftar till utveckling och prov av praktiska ingenjörlösningar för att genomföra deponering har också inkluderats. Dessa aktiviteter har dock begränsats eftersom de ingår i andra projekt.

## Mål och utförande

Huvudmålen för Prototypförvaret är

- att demonstrera funktionen och samverkan hos djupförvarets delar och jämföra utfallet med modeller och antaganden,
- att utveckla och pröva ändamålsenliga kriterier och kvalitetssystem, samt
- att simulera tillämpliga delar av förvarsutformnings- och designprocessen.

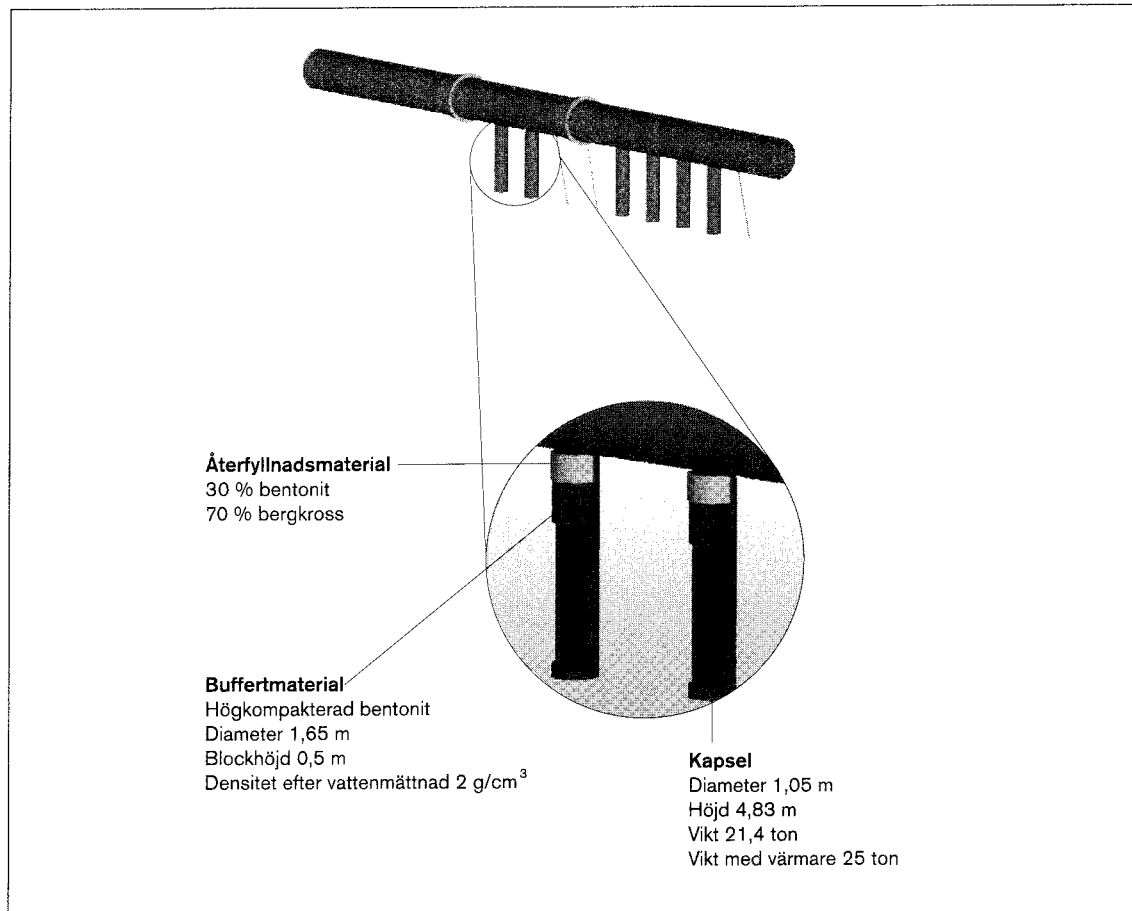
Prototypförvaret skall i största möjliga utsträckning simulera ett verkligt förvar med avseende på geometri, material och bergförhållanden. Prototypförvaret utformas för att simulera ett KBS-3-förvar under vad som kan beskrivas som normala förhållanden eller det referensscenario som beskrivs i SR-95. Prototypförvaret skiljer sig från ett verkligt förvar i det att värmeeffekten kommer att genereras av elektriska värmare istället för använt kärnbränsle.

Prototypförvarets utveckling kommer att följas under en lång tid, möjligtvis upp till 20 år. Detta för att få erfarenhet av en förhållandevis lång drifttid som kan utnyttjas inför ansökan om reguljär drift av djupförvaret. Trots en relativt lång försökstid kan prototypförvaret inte användas för att demonstrera den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar.

Prototypförvaret kommer att byggas i inre delen av den TBM-borrade tunneln på 450 m djup i Äspölaboratoriet. Preliminärt planeras för 6 deponeringshål i full skala med ett avstånd mellan hålen av ca 6 m, vilket är detsamma som planeras enligt KBS-3-konceptet. Avståndet mellan pluggarna och det närmsta deponeringshålet blir minst 8 m. Den föreslagna konfigurationen visas i Figur 14-12. TBM-tunneln ovanför deponeringshålen kommer att återfyllas helt. Resultaten från försöket med prov av olika återfyllnadsmaterial kommer att användas som underlag för val av återfyllnadsmaterial i detta försök. En tunnelplugg kommer att skilja den yttre och den inre delen av försökstunneln. Pluggarna kommer att konstrueras för att tåla kombinationen av fullt vattentryck och svälltryck från buffert och återfyllnadsmaterial. Den yttre delen av försöket är tänkt att drivas i ca 5 år. Därefter bryts denna del av försöket, pluggen rivs, återfyllnadsmaterialet och bufferten grävs ut och provtas, kapseln återtogs och undersöks. Den inre delen lämnas kvar och försöket i denna del drivs vidare i 10–20 år.

Prototypförvaret kommer att instrumenteras för att kunna studera följande processer eller storheter:

- vattenupptagning i buffert och återfyllnad,
- temperaturfördelningen i kapsel, buffert, återfyllnad och berg,
- svälltryck och rörelser i buffert och återfyllnad,



*Figur 14-12. Planerad utformning av Äspö prototypförvar.*

- bergspänningar och rörelser i omgivande berg, samt
- kemiska processer.

### **Provning av olika återfyllnadsmaterial**

Byggandet av ett djupförvar får inte innebära att man skapar nya flödes- och transportvägar som väsentligt försämrar bergets barriärfunktion. Det leder till att tunnarna måste återfyllas med ett material med låg hydraulisk konduktivitet och/eller förslutas med strategiskt placerade pluggar. Det övergripande kravet är att tunnarna inte skall utgöra en väsentlig flödesväg i relation till de naturliga flödesvägar som utgörs av bergets sprickor. Kravet på tunnelåterfyllnaden måste också ses i relation till egenskaperna hos den skadade zonen runt tunnarna då det är den sammantagna funktionen som är av betydelse. Dessa krav kan uppfyllas genom att ha en lågpermeabel tunnelåterfyllning bestående av en blandning av krossat berg och bentonit eller en tunnelåterfyllnad bestående av enbart krossat berg kombinerat med lämpligt placerade pluggar. En annan viktig funktion hos återfyllnaden i deponeringstunnarna är att motverka expansion av bufferten från deponeringshålen.

Olika material och metodik för återfyllning av tunnlar i ett djupförvar har övervägts i SKB:s utvecklingsarbete genom åren. Ett alternativ var baserat på ett återfyllnadsmaterial som består av en blandning av kvartssand ("Bornholmssand") och bentonit som läggs ut i lager

och kompakteras med vibrerande utrustning. Överst mot taket skulle blandningen bara blåsts in, vilket dock ger en lägre täthet i den delen av återfyllnaden. Möjligheten att ersätta kvartssand med krossberg från de utbrutna tunnarna i djupförvaret har analyserats /14-64/. Slutsatsen är att erforderliga funktionskrav även kan uppfyllas med krossat berg som ballastmaterial. I en annan studie /14-65/ dras slutsatsen att ett återfyllnadsmaterial bestående av enbart sand eller bergkross utan bentonit uppfyller kraven på säkerhet mot radionuklidmigration om tunneln ej korsar större sprickzoner och vattenflödet genom tunneln är litet. Prov kommer att göras med olika återfyllnadsmaterial för att i fullstor skala bekräfta modellerna för återfyllnadsmaterialets hydrauliska och mekaniska egenskaper i ett djupförvar. I samband med provning av olika återfyllnadsmaterial utvecklas och provas även teknik för packning och återtag (utgrävning) av återfyllnadsmaterial i tunnlar.

I det planerade djupförvaret kommer deponering att ske successivt. Då deponering skett längs en tunnel och den återfyllts måste tunneln förseglas med en temporär plugg. Försöken med olika återfyllnadsmaterial kommer även att innefatta utveckling och provning av teknik för placering, konstruktion samt funktion av en tunnelplugg.

### Mål och genomförda arbeten

Provning av olika återfyllnadsmaterial (Backfill and Plug Test) genomförs med det huvudsakliga syftet

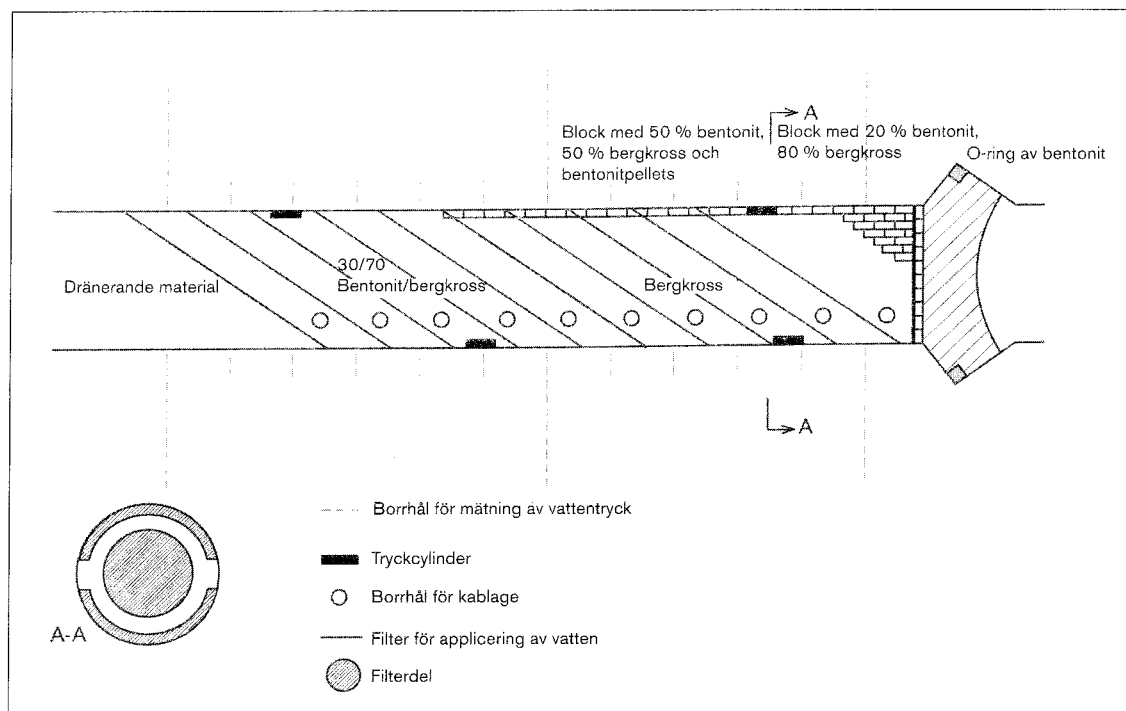
- att utveckla och prova olika material och packningsteknik för återfyllnad av sprängda tunnlar,
- att prova återfyllnadens funktion och samverkan med omgivande berg i full skala i en sprängd tunnel, samt
- att utveckla och prova teknik för och funktion hos pluggar för temporär förslutning av deponeringstunnlar.

Inledande försök med olika material för återfyllning av deponeringstunnlar genomfördes 1995 och 1996. Försöket syftade i första hand till att prova teknik för återfyllning och kontroll av vilka tätheter som kan erhållas i praktiken. Som återfyllnadsmaterial användes de bergmassor som erhållits från TBM-brytningen av Äspötunneln blandad med bentonit. Prov av återfyllning gjordes dels med okrossade TBM-massor, dels med krossade TBM-massor samt med krossade TBM-massor blandade med 10, 20 respektive 30 viktprocent bentonit. Totalt hanterades ca 1600 ton återfyllnadsmaterial. Krossning och blandning av återfyllnadsmaterialet fungerade väl. På grund av det relativt stora vatteninflödet till orten uppstod problem vid kompaktering av de horisontella lagren i botten av tunneln. Den teknik som utvecklats för kompaktering av lutande lager befanns fungera mycket bättre och kommer att användas för hela tvärsnittsarean i kommande försök. God packning erhöles av återfyllnadsmaterialet förutom i en zon närmast berget. Som en följd av detta har en vidareutveckling av packningsutrustningen skett. Utgrävningen av den kompakterade tunnelåterfyllen gick utan problem /14-31/. Laboratorieförsök har genomförts för att bestämma materialegenskaperna hos de olika återfyllnadsmaterialen /14-32/.

### Planerade arbeten

Försöket lokaliseras till ZEDEX-orten, som är utbruten med normal sprängteknik, på 420 m djup i Äspölaboratoriet. Den inre testdelen av orten fylls med en blandning av 30 viktprocent bentonit och krossat berg. Den yttre testdelen av orten fylls med krossat berg





*Figur 14-13. Översikt av försöksutformning för Backfill and Plug Test.*

utan inblandning av bentonit. I denna del placeras ett lager förkompakterade block bestående av 50 viktprocent bentonit och krossat berg närmast taket. Återfyllningen packas med lutande skikt, en teknik som utvecklats i förberedande försök. Försökstunneln försluts med en betongplugg (Figur 14-13). Återfyllnaden instrumenteras och mätningar genomförs av återfyllnadens och pluggens tätningsförmåga. Efter avslutade mätningar grävs återfyllningen ut, provtas och analyseras. Försökets utformning och omfattning beskrivs närmare i /14-66/.

### **Demonstration av deponeringsteknik**

Utveckling och prov av metodik och utrustning för inkapsling och deponering av använt kärnbränsle i ett djupförvar är en viktig del av SKB:s program. Utöver de tekniska aspekterna är det också viktigt att på ett åskådligt sätt kunna visa de olika stegen i inkapsling, transport, deponering och återtag av använt kärnbränsle för specialister och allmänhet. Som en del i det övergripande programmet har SKB etablerat ett Kapsel-laboratorium i Oskarshamn vilket togs i drift under 1998. Demonstration av deponering och återtag kommer att genomföras vid Äspölaboratoriet. Demonstrationsprojektet utgör ett komplement till Prototypförvaret och Backfill and Plug Test vilka fokuserar på den integrerade funktionen hos ingenjörbarriärerna under realistiska förhållanden.

Utveckling av maskiner för deponering av kapslar ligger inte under Äspölaboratoriets ansvarsområde utan Äspölaboratoriet ansvarar endast för fältaktiviteterna. Beskrivningen nedan fokuseras på Äspölaboratoriets roll i detta projekt.

## Mål och utförande

Målet med demonstrationen av deponeringsteknik är

- att utveckla och prova metodik och utrustning för inkapsling och deponering av använt kärnbränsle,
- att på ett åskådligt sätt för specialister och allmänhet demonstrera de olika stegen vid deponering och återtag av kapslar, och
- att utveckla och prova ändamålsenliga kriterier och kvalitetssystem för deponeringsprocessen.

Demonstrationen av deponeringsteknik kommer att genomföras i en ort på 420 m nivån. Denna plats ger en realistisk miljö för genomförande av försöken samtidigt som den medger transport av tunga fordon till försöksområdet. Demonstrationen kommer att omfatta hantering och deponering av kapslar och bentonitbuffert i fyra fullstora deponeringshål. De moment som förväntas bli provade och demonstrerade är:

- länsumpning av hål,
- uppbyggnad av bentonitbuffert,
- deponering av kapsel,
- uppbyggnad av resterande bentonitbuffert över kapsel,
- fyllning med vatten,
- återfyllning av deponeringshål över bentonitbuffert.

### **Prov av återtag**

Den stegvisa utvecklingen av tekniken för deponering av använt kärnbränsle leder till att om utvärderingen efter den inledande driften av djupförvaret resulterar i den använda tekniken inte bedöms som tillfredsställande så måste kanske kapslarna återtas och hanteras på något annat sätt. Utvärderingen sker troligen efter det att bentoniten har vattenmättats och svällt så att kapseln sitter fast i hålet. För att återta kapseln måste först bentonitens tryck mot kapseln reduceras så att kapseln kan lyftas upp utan att den förstörs.

## Mål och utförande

Målet för prov av återtag är

- att utveckla och prova metodik och utrustning för att lösgöra kapseln från den vattenmättade och uppsvällda bentoniten, samt
- att visa hur en frigjord kapsel kan återtas under realistiska förhållanden.

Prov av återtag genomförs i en ny tunnel på 420 m nivån i Äspölaboratoriet. Efter geologisk karakterisering av tunneln kommer två fullstora deponeringshål att borraras. Kapslar med elektriska värmare sänks ned i hålet och omges med bentonitblock och viss instrumentering. Hålen försluts med betongpluggar. Tunneln ovanför hålen återfylls inte.

Därefter lämnas hålen för att vattenmättas. Detta förväntas ta 3–5 år. Under tiden utvecklas teknik och maskiner för frigörande av kapseln från bentoniten. Eventuellt utvecklas två olika tekniker som kan provas, en i respektive hål. De tekniker som idag identifierats som möjliga är dels disintegration av bufferten genom spolning med saltvatten och dels kylning (och därmed krympning) av bentoniten /14-68/.

Efter det att bentoniten vattenmättats inleds själva återtagsförsöken. Kapseln lösgörs från bentoniten, kapseln greppas i locket och förs in i ett strålskydd.

### ***Prov av alternativ deponeringsteknik***

SKB har sedan KBS-3-metoden presenterades 1983 utvecklat och analyserat några intressanta alternativ till KBS-3-konceptet (se t ex rapporten SKB TR 93-03). Vid jämförelsen av dessa alternativa metoder har KBS-3-metoden framstått som den fördelaktigaste. Studier av några alternativa utformningar av KBS-3-konceptet har dock fortsatt. De mest aktuella alternativen är horisontell placering i medellånga tunnlar (MLH) eller i hål borrade i tunnelväggen (KBS-3H) samt placering av två kapslar i varje vertikalt deponeringshål. Förutom själva placeringen av kapseln har studien omfattat analys och jämförelse av olika sätt att deponera samt olika utformning på strålskydd, kapsel och buffert /14-69/. Resultatet av jämförelsen är att KBS-3-metoden fortfarande skall utgöra referensalternativ men att MLH-metoden bör studeras vidare så att man kan bedöma om den utgör ett realistiskt alternativ till KBS-3-metoden.

### **Mål och utförande**

Målet är att ta fram ett fördjupat underlag för bedömning av horisontell deponering som ett alternativ till KBS-3-metoden.

MLH-metoden är jämfört med KBS-3-metoden baserad på mer oprövade tekniska lösningar och ett flertal system och tekniska detaljlösningar behöver studeras. Väsentligt för metoden är att utveckla rationella system för tunnelborring, tekniker för tätning och bergförstärkning samt metoder för deponering av kapslarna. Av avgörande betydelse för den långsiktiga funktionen och säkerheten är tekniken för inplacering av kapsel och den omkringliggande bentoniten samt densiteten och homogeniteten hos bentoniten efter förslutning. Fördjupade analyser erfordras avseende utformning av lämplig deponeringsmetod och maskinutrustning. För MLH-metoden behövs också en översyn av dimensionen på deponeringshålen med avseende på möjligheten att borra hålen och utföra deponeringen av kapseln och inplaceringen av bentoniten.

Som en del i detta arbete följer SKB noga resultaten från det experiment avseende horisontell deponering i tunnlar, FEBEX, som för närvarande genomförs i Grimsel. Erfarenheterna från experimentet i Grimsel, de planerade försöken med vertikal deponering i Äspölaboratoriet samt ovan redovisade utredningar torde ge en god grund för att bedöma om ytterligare alternativ skall provas i full skala i Äspölaboratoriet. Beslut om detta kommer att tas under den kommande perioden.

### ***Långtidsprov av buffertmaterialets funktion***

Buffertmaterialets funktion har tidigare provats i Stripa under en tidsrymd av upp till 5 år /14-67/. Dessa försök gjordes i vatten med låga salthalter, under relativt låga vattentryck och måttliga temperaturer (ca 80°C). Ett av resultaten var att man fann en förväntad

förhöjd kloridhalt i den inre delen av bufferten närmast värmaren. (Ökningen i kloridhalt var dock för liten och oregelbunden för att entydigt kunna tolkas som ett anrikningsfenomen.) Ett försök med fransk lera genomfördes vid en temperatur av ca 180°C, vilket resulterade i en allvarlig försämring av bentonitens buffertegenskaper närmast värmaren till följd av en kombination av saltanrikning, upplösning av kvarts i bentonitmaterialet och cementering (bildning av "lersten"). Olika tänkbara mineralogiska och kemiska processer har studerats i laboratorieförsök. Resultaten visar att de negativa effekterna på buffertfunktionen är försumbara om bufferten utformas med den täthet (ca 2,0 g/cm<sup>3</sup> efter vattenmättnad) som är tänkt i KBS-3, där bentonitblock förkompakteras med hög vattenmättnadsgrad och temperaturen hålls på måttlig nivå (under 100°C) /14-70/. Det är väsentligt att verifiera laboratorieresultaten och framtagna modeller under realistiska djupförvarsförhållanden under långa tidsrymder, eventuellt upp till 20 år.

## Mål och utförande

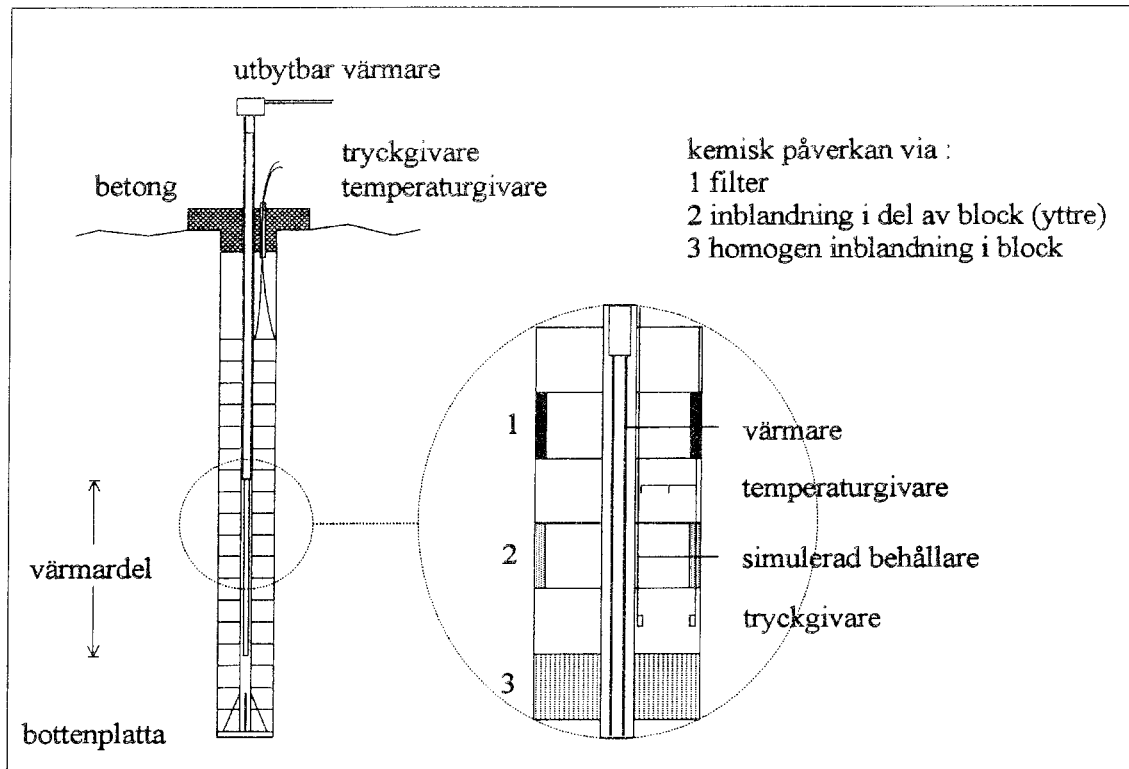
Målen för långtidsproven av buffertmaterialets funktion är

- att prova bentonitbuffertens funktion i djupförvarsmiljö under lång tid (upp till 20 år),
- att prova modeller och bekräfta resultat från laboratorieexperiment rörande omvandling av smektit till illit, saltanrikning och inverkan av högt pH,
- att utesluta förekomsten av icke identifierade men möjliga processer i djupförvarsmiljö.

Långtidsförsöken med bentonitens funktion är tänkt att genomföras i 4 m djupa borrhål med en diameter av ca 300 mm. I hålen nedsänks kompakterade bentonitblock med en värmare i mitten (Figur 14-14). Hålen instrumenteras för mätning av temperatur, tryck och värmeledningsförmåga (vattenhalt) under försökets löptid. För provning av bufferten under förhållanden representativa för referenskonceptet drivs temperaturen till en maximal nivå av ca 100°C och hålen fylls med MX-80 bentonit med hög vattenmättnadsgrad. För provning under avvikande förhållanden kombineras försök med saltanrikning, cementering och illitisering i samma hål. Eftersom dessa processer är temperaturberoende genomförs försöken vid högre temperatur än 100°C.

Det första skedet av projektet har genomförts. Ett hål har instrumenteras enligt referenskonceptet och ett hål för prov av avvikande förhållanden. Mätningar av buffertens funktion i dessa hål har skett under drygt 1 år med max temperaturer på 90°C respektive 130°C. Därefter har bufferten tagits upp genom överborrning av respektive testhål. Prover har tagits och skickats till laboratoriet för att kvantifiera intressanta parametrar, t ex vattenmättnad, kemisk sammansättning hos buffer och porvatten, mineralsammansättning, svälltryck, hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet. Dessa hål utnyttjades i första hand som ett pilotförsök för test av instrumentering och experimentkoncept innan långtidsförsöken inleddes.

Långtidsförsöken beräknas ske i totalt 4 hål där försöken successivt kommer att brytas efter 5 respektive 10 eller maximalt 20 år. När försöket i respektive hål bryts tas bufferten upp genom överborrning och bufferten provtas på ett liknande sätt som gjorts för pilothål. Försökets utformning och omfattning beskrivs närmare i /14-71/



*Figur 14-14. Principiell utformning av försök för långtidstest av buffertmateriallets funktion.*

### **Injekteringsteknik**

Programmet för utveckling av injekteringsteknik syftar till en ökad kunskap om processer och faktorer som påverkar åtgången av injekteringsmaterial och erhållet injekteringsresultat, samt utveckling av praktisk teknik för att bemästra förhållanden som kan uppstå i djupförvaret och som inte kan lösas på ett säkert sätt med dagens kommersiella metoder. Kunnande och teknik behöver verifieras genom försök under realistiska förhållanden.

#### **Mål och utförande**

Målet är att verifiera kunnande och teknik om injektering/förstärkning av större transmissiva diskontinuiteter och starkt vattenförande diskontinuiteter med måttlig mäktighet och utbredning.

För karakterisering av berg ur injekteringssynpunkt planeras utveckling av en för ändamålet anpassad hydraultestmetod. Utrustning provas i Äspölaboratoriet under väl kontrollerade former, och studie av noggrannheten i karakteriseringen sker genom injektering i borrhål.

Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan studeras genom undersökning av lämpliga avsnitt i Äspötunneln där enbart förinjektering genomförts.

De modeller som utvecklats för att förutsäga resultatet av injektering under olika geologiska förhållanden kommer att provas i fältförsök. Först genomförs karakterisering av den bergvolym som skall injekteras. Utifrån dessa data och framtagna modeller görs en förut-

sägelse om förväntat resultat. Därefter genomförs injektering och prov för att bedöma injekteringsmedlets spridning och tätande förmåga.

### ***Tätning av undersökningsborrhål***

Vid plats- och detaljkaraktisering kommer ett antal undersökningsborrhål att borrar för att erhålla data på bergets egenskaper vilka ligger till grund för utformning av förvaret och bedömning av dess långsiktiga säkerhet. Dessa borrhål måste tätas, senast i samband med förslutning av förvaret, så att de inte utgör snabba flödesvägar från förvarsdjup till biosfären. Tätning avses ske genom att hålen fylls med bentonit eller cement. Då de flesta borrhålen kommer att instrumenteras i samband med undersökningarna på en plats erfordras även tillgång till pålitlig teknik för rensning av borrhål så att de senare kan tätas.

Teknik för tätning av borrhål har tidigare utvecklats och provats inom ramen för Stripa projektet /14-67/. Två olika tekniker användes för att föra in högkompakterade bentonitblock i borrhål med en längd av upp till 200 m. Mycket god tätning erhöles. En vidareutveckling av tekniken erfordras för att visa att borrhål med längder upp till 1000 m kan tätas.

### **Mål och utförande**

- Att utveckla robust och tillförlitlig teknik för rensning av borrhål från instrumentering och andra hinder.
- Att utveckla robust och tillförlitlig teknik för tätning av borrhål samt verifiera att tekniken ger önskad täthet.

Projektet 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.

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 dess hål väljs för prov av teknik för rensning och tätning av hål.

### ***Gastransport i vattenmättad buffert***

#### **Bakgrund**

I en kapsel med en genomgående defekt kan vatten tränga in genom kopparhöljet och korrodera gjutjärnsinsatsen. I reducerande miljö bildas bland annat vätgas, som samlas i en gasbubbla med stigande tryck om produktionshastigheten är högre än vad som kan lösas i vattnet. När trycket blir tillräckligt stort bildas en flödesväg genom bufferten. Trycket kommer att sjunka och, om gasproduktionen är tillräckligt låg, kommer flödesvägen att stängas. Omfattande studier har visat att det kritiska gastrycket för genombrott bestäms av summan av buffertens svälltryck och det hydrostatiska trycket. Flödesmotståndet i berget antas vara mindre än i bufferten, vilket skulle leda till att när gasen passerat genom bufferten sker den vidare spridningen ut i geosfären relativt snabbt /14-72/.

I pågående laboratorieförsök med små gasflöden studeras hur gas tar sig igenom bufferten och vid vilka tryck, bland annat efter upprepade tryckuppbyggnads- och genomflödessekvenser. Modellering av transporten pågår.

### Mål och utförande

Att under realistiska förhållanden och i fullstor skala studera transport av små gasflöden genom vattenmättad bentonit och vidare ut i omgivande berg.

En eller flera försöksuppställningar planeras med bentonitbuffert i berg, där buffertens tjocklek är 350 mm, vilket är lika med buffertens planerade tjocklek i djupförvaret. På den ena sidan läggs bufferten an mot en kopparplatta med dysa för gasutsläpp. Den andra sidan står i kontakt med berg. Gasflödet skall kunna anpassas till den gasproduktion som är sannolik i ett djupförvar. Dock måste helium- eller argongas användas i laboratoriet istället för vätgas. Planeringen av försöksuppställningar behöver göras bland annat med hjälp av den gasflödesmodell som är under framtagning inom det pågående projektet GAMBIT. Numeriska beräkningar och försöksdesign bedöms kunna genomföras under perioden. Försöksuppställning, vattenmättnad av bentoniten och genomförande av gasförsök påbörjas först nästa treårsperiod.

### ***Kopparkorrosion***

Korrosionsegenskaperna hos koppar är väl utredda. En sammanfattande bedömning av kunskapsläget beträffande kopparkorrosion ges i /14-73/. Slutsatsen är att det är mycket osannolikt att allmän eller lokal korrosion skulle vara begränsande för kapselns livslängd i djupförvaret. Grundvattensammansättningens påverkan på korrosionen av koppar har också utretts. Slutsatsen är att korrosionsbeständigheten inte påverkas i någon större utsträckning av de lokala variationer i grundvattenkemi som kan accepteras för valet av förvarsplats eller förläggning inom en vald förvarsplats.

### Mål och utförande

Målet är att utvärdera nuvarande modeller för kopparkorrosion för olika grundvatten.

För att utvärdera modeller för kopparkorrosion genomförs långtidsförsök där koppar placeras i grundvatten med olika sammansättning (syrehalt, sulfidhalt och kloridhalt). Kopparmetall placeras i behållare med genomströmmande grundvatten på olika platser i Äspölaboratoriet. Koppar kommer också att exponeras omgiven av bentonit. Jämförelse görs även med kopparkorrosion i luft.

## **14.5 Information**

Information om Äspölaboratoriet och dess verksamhet är en viktig och integrerad del i laboratoriets verksamhet. Allmänhet och närboende informeras på platsen. En särskild besöksnisch är iordningställd i tillfartstunneln där SKB:s verksamhet och Äspölaboratoriet presenteras. Utställningar som beskriver Äspölaboratoriets verksamhet och resultat finns även i Äspö By. Vidare finns allmän information i utställningslokalen i Simpevarps by och en "naturstig" ute på Äspö; båda är öppna för allmänheten.

Varje vår organiseras Äspödagen där allmänheten bjuds in att besöka Äspölaboratoriet. Normalt kommer mer än 500 personer. Under sommaren ordnas visningar av Äspölaboratoriet i samarbete med OKG och turistbyrån i Oskarshamn. Laboratoriet visas övrig tid endast för föranmälda besökare. Antalet besökare per år är ungefär 5 000 personer.

En utställning om SKB:s verksamhet kommer att byggas upp i det nya kontoret som blev klart 1998. I och med detta sker en utökad satsning på information om SKB:s verksamhet vid Äspölaboratoriet.

## 14.6 Internationellt deltagande

Verksamheten vid Äspölaboratoriet har rönt stort internationellt intresse. Avtal om deltagande finns med Atomic Energy of Canada Limited (AECL); Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), 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 Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Tyskland och Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) samt United States Department of Energy (USDOE), 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. Ett utbyte som borgar för att alla de organisationer som deltar i Äspösamarbetet kan hålla sig i forskningsfronten och kan delta i en kreativ tvärvetenskaplig forskningsmiljö med potential att föra kunskapen framåt. Ett exempel på detta är samarbetet kring modeller för grundvattenströmning och radionuklidtransport som genomförs i en arbetsgrupp, s k Task Force, med medlemmar från de deltagande organisationerna (se avsnitt 14.4.2). En viktig del i samarbetet är också den granskning som SKB:s internationella partners och deras experter gör av Äspölaboratoriets planer för utformning av olika experiment samt erhållna resultat. Sammantaget ger det internationella samarbetet ett mycket värdefullt bidrag till SKB:s program.

Resultat från det internationella samarbetet redovisas i en separat rapportserie, Äspö International Cooperation Reports.



## 15 Naturliga analogier

Det övergripande målet för analogistudierna är att validera (pröva) antaganden och modeller som är viktiga för djupförvarets säkerhet /15-1/. Ambitionen är att hitta naturliga exempel på processer som är viktiga för den långsiktiga säkerheten. Långsamma eller lågintensiva processer, t ex lakning, vittring och radiolys, är inte alltid så enkla att undersöka i laboratorium, men de kan ha betydelse på sikt. Mycket av undersökningarna sker i form av större internationella projekt. Fördelarna med ett sådant arbetssätt ligger inte enbart i det uppenbara, dvs att fler intressenter kan dela på kostnaderna. Stöd och deltagande från organisationer i flera olika länder bidrar dessutom med olika synsätt och erfarenheter, vilket gör att resultaten granskas kritiskt.

### 15.1 Naturliga analogier och säkerhetsanalys

Projektformen är ett effektivt sätt att bedriva analogiundersökningarna, men projektets tidsramar tillåter inte alltid en fullständig utvärdering. Provtagning och analys måste göras med största omsorg och det medför inte sällan att utvärderingsfasen blir forcerad eller hårt hållen till de ursprungliga målsättningarna. Av det skälet kan det vara fördelaktigt att gå igenom materialet ännu en gång efter att projektet avslutats. Exempel på sådana ”återbesök” i data från tidigare projekt är Poços de Caldas och Cigar Lake. För grundvattnets spårämnen i Poços de Caldas kunde man visa att en bättre överensstämmelse med beräknade värden erhöles om man inkluderade effekten av medfällning. Det visade sig att lösligheten av elementen uran, zink och sällsynta jordartsmetaller kontrollerades av järnhydroxidmineral medan strontium styrdes av flusspat. Medfällningen leder till koncentrationer som är 2–4 storleksordningar lägre än väntat. Samma sak skulle gälla för radionuklider av dessa element /15-2/.

Med data från urangruvan Osamu Utsumi i Poços de Caldas har man beräknat hur en redoxfront utvecklas. De här beräkningsmodellerna togs ursprungligen fram för att simulera utvecklingen av närområdet kring en skadad kapsel. Mycket beräkningar gjordes efter att Poços de Caldas-projektet avslutats och arbetet finns redovisat i Leonardo Romeros doktorsavhandling vid Kemiteknik, KTH, 1995 /15-3/. En väsentlig slutsats är att redoxfronten från en skadad kapsel aldrig når utanför bentonitbufferten /15-4/.

Ett annat exempel på ”återbesök” är Cigar Lake. Projektet pågick från 1989 till 1993. Efter att undersökningarna var avslutade och avrapporterade så ägnades ytterligare tid och resurser åt en grundligare utvärdering av speciellt utvalda delar av materialet. Följande resultat uppnåddes därigenom /15-5/:

- En mer realistisk radiolysmodell utvecklades och testades.
- Hydrotermala beräkningsmodeller användes för att förklara uppkomsten av Cigar Lake malmen.
- Lerans roll som buffert och barriär kring malmen prövades.

Metoderna som utvecklades för att beräkna radiolys av vatten i Cigar Lake malmen var bättre än de överkonservativa modeller som använts för säkerhetsanalyser tidigare. De

geokemiska förhållandena kan mycket väl förbli reducerande trots radiolys, åtminstone om strålningens intensitet är lika låg som i Cigar Lake.

De hydrotermala beräkningarna visar att grafit spelat en viktig roll för bildningen av malmkroppen. Det förklarar varför man inte hittar någon malm vid det närbelägna Close Lake där förhållandena i övrigt varit likartade.

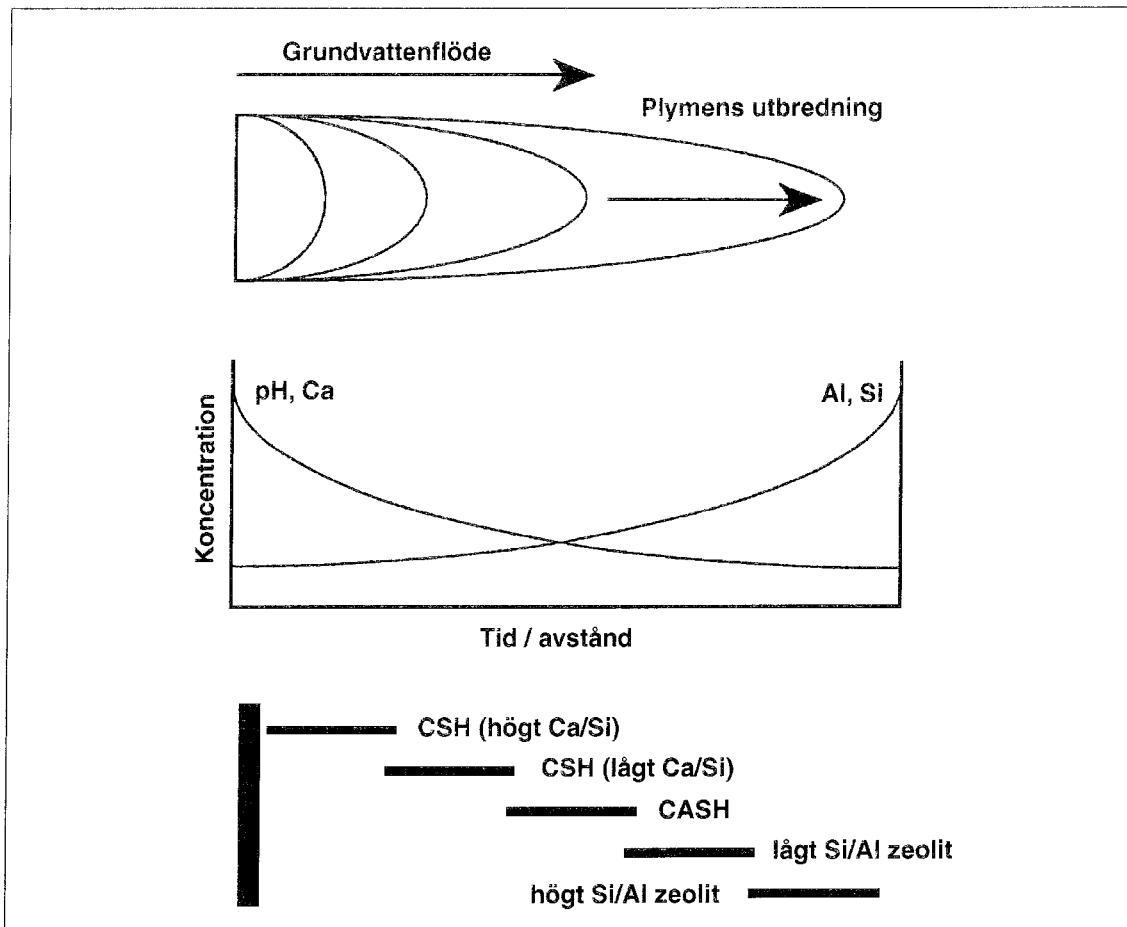
Leran, som uranmalmen ligger inbäddad i, jämfördes med bentonit och man kom fram till att Cigar Lake leran fungerat som en effektiv barriär mot vattenflöde och mass-transport, trots sina sämre fysikaliska egenskaper jämfört med bentonit. Det är två faktorer som har bidragit mest till att skydda malmen i Cigar Lake: den låga hydrauliska konduktiviteten hos leran relativt omgivande sandsten, samt kapaciteten att bevara reducerande geokemiska förhållanden. Leran har varit av stor betydelse i båda fallen.

## 15.2 Jordanien

Projekt Maqarin (även kallat Jordanienprojektet) startade 1990 med stöd av Nagra, Nirex och Ontario Hydro. SKB har deltagit sedan 1991. Projektet är nu inne i sin tredje fas och stödjande organisationer är EA (Environment Agency, UK), Nagra, Nirex och SKB. Den tredje fasen samordnas och administreras av SKB. Vi arbetar som bäst på slutrapporten för fas 3.

Cement och betong är tillverkade av människan och flera av mineralen i cementpasta är ovanliga i naturen. De få naturliga exempel som finns är av stort intresse, eftersom de kan ge oss kunskap om betongens egenskaper på lång sikt, eller hur omgivningen påverkas. Den senare frågan, dvs hur Portlandcementens höga pH påverkar närområdet, är den huvudsakliga anledningen till intresset för hyperalkaliska källor. Starkt alkaliska källor med ett pH på upp till 11 finns i områden med sk ofioliter, t ex på Cypern och i Oman. Det höga pH-värdet uppstår när ultramafiter i de ofiolitiska formationerna vittrar till serpentinit. De hyperalkaliska källorna i Maqarin i Jordanien har emellertid ett helt annat ursprung. Märgel, en lerhaltig kalksten som det finns gott om i området och dessutom innehåller bitumen (15–20 %), har brunnit över stora områden och bildat ett cementliknande material. Den omvandlade (brända) zonen ligger inom den ursprungliga bitumenhaltiga märgeln och varierar kraftigt i tjocklek, från någon meter upp till ett maximum på 60 m. Man tror att lagren självantänd genom oxidation av pyrit som det finns gott om i märgelstenen. Grundvatten som kommer i kontakt med den omvandlade zonen får en sammansättning mycket nära cementporvatten, dvs pH hamnar i området 12–13 och de dominerande katjonerna är kalcium, natrium och kalium. Vanligaste anjonerna är sulfat och hydroxid. Det handlar alltså om ett vatten i Maqarin som är 10–100 gånger mer alkaliskt än det man finner i Oman och på Cypern.

I Maqarin ser man hur det hyperalkaliska vattnet har påverkat omgivande berg /15-6/. Nya mineral bildas vilket stämmer med teoretiska förutsägelser. Dvs först bildas zeoliter när pH ökar. Därefter kommer kalciumaluminasilikater (betecknas CASH i cementnomenklatur) och kalciumsilikater (CSH), se Figur 15-1. Sprickor tenderar att fyllas igen av de sekundära mineralen, men det finns inget som tyder på att radionuklidretentionen skulle minska. Matrisdiffusion är alltså möjlig, eftersom porutrymmen förblir öppna bakom de vattenförande sprickorna. Den allmänna slutsatsen är att vattenflödet i närområdet tenderar att minska när vattenförande sprickor sätter igen sig, men berget bakom förblir intakt och tillgängligt för retention av radionuklider genom matrisdiffusion.



**Figur 15-1.** Schematiskt diagram över utbredningen och reaktionerna i en "alkalisk plym" /15-6/.

Kolloider, upplöst organiskt material och bakterier studeras i Maqarin. Koncentrationen av kolloider är mycket låg, vilket överensstämmer med motsvarande observationer av kolloider i betongporvatten och beror på att vattnet är starkt mineraliserat (hög halt av kalcium bland annat). Det organiska materialet skiljer sig från de humusämnen man normalt hittar i grundvatten. Detta undersöks närmare. Man hittar bakterier i det hyperalkaliska källvattnet, men de är inte alkalofila och inte heller aktiva. Själva frånvaron av anpassning tyder på att det kanske är en för livsfientlig miljö även för bakterier.

### 15.3 Oklo

Till för 25 år sedan ansågs allt uran i naturen ha samma isotopförhållande  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ , men år 1972, under en rutinanalys av uran inför anrikning, så upptäckte man uran med lägre isotopförhållande än normalt. Provet kom från en gruva i Oklo, Gabon, som innehöll flera förekomster av höggradig uranmalm på 20 % och mer. Ganska snart så fann man att det "onormala" uranet kom från zoner i malmen som dessutom innehöll andra grundämnen med ovanlig isotopsammansättning. De kunde bara ha bildats genom fission av  $^{235}\text{U}$  och det måste ha skett för mycket länge sedan. Tidiga undersökningar i Oklo koncentrerades till det som nu kallas zon 2. Den ligger i den del av gruvan som är dagbrott och zon 2 gav en bra bild av hur en typisk Okloreaktor hade fungerat.

Med tiden fortsatte brytningen i Oklo mot djupet i dagbrottet och vidare under jord. Nya reaktorzoner hittades. År 1991 så startade Okloprojektet för att studera reaktorzonerna som naturliga analogier till djupförvar med högaktivt avfall. Projektet drevs av Franska CEA med stöd av EU. Ett aktivt samarbete etablerades med SKB och andra organisationer som var utanför EU. Arbetet koncentrerades till zonerna 10 och 13 som låg under jord i Okelobondo, strax söder om Oklo, och till den zon som ligger i Bagombé, omkring 20 km längre söderut. Bagombé var av speciellt intresse för SKB eftersom den låg nära ytan och visar på spår av oxidativ vittring. Det här projektet, som även kallas Okloprojektet, fas 1, avslutades 1995 och slutrapporterades 1996.

I och med att Sverige gick med i EU så blev det möjligt för SKB att delta som fullvärdiga medlemmar i den andra fasen av Okloprojektet, tillsammans med CEA, ENRESA och ANDRA. Fas 2 startade officiellt i juni, 1996, och avsikten är att projektet skall pågå i tre år. Gruvbolaget COMUF lägger ner sin verksamhet i Oklo under 1998 och därefter kan det bli svårt att göra något mer i gruvan. Mycket av den nya provtagningen har varit koncentrerad till Bagombé som erbjuder de bästa förhållandena. Här har reaktorn aldrig frilagts och här finns grundvatten som inte påverkats av någon gruvbrytning. All provtagning sker via borrhål.

För 2 miljarder år sedan hade uran i naturen ett isotopförhållande  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  som i anrikat reaktorbränsle. Med tillräckligt mycket sådan uran i en malm och med någon lämplig moderator som t ex vatten så kunde man få en spontan kriticitet med kärnklyvning till stånd. Numera är detta inte möjligt eftersom  $^{235}\text{U}$  avklingat snabbare än  $^{238}\text{U}$  och isotopförhållandet därigenom minskat. Välbevarade uranitkristaller från reaktorzon 10 visar med sitt innehåll av radiogent bly att reaktorn är 1968 miljoner år gammal. Än så länge är Oklo den enda platsen på jorden där man funnit exempel på naturlig kriticitet. Det är inte så konstigt eftersom det är många villkor som måste vara uppfyllda innan man kan få en naturlig kriticitet i uranmalm. Idag är det omöjligt på grund av den lägre koncentrationen av  $^{235}\text{U}$ , men för 2 miljarder år sedan var den tillräckligt hög. Långt dessförinnan var isotopförhållandena ännu högre, men då saknades syrgas i atmosfären och det behövs för att koncentrerade uranmalmer skall kunna bildas. Livet på jorden har således bidragit med lakning (oxidation) och utfällning (reduktion) av uran. Andra "tursamma" omständigheter sammanföll i Oklo och bidrog till att reaktorerna blev möjliga. Malmen var mycket rik på uran, vatten fanns med i rätta proportioner, medan däremot metaller som fångar neutroner, s k reaktorgifter, saknades. Det senare är anmärkningsvärt eftersom vanadin och mangan, som båda är neutronfångare, brukar åtfölja uran men inte i Oklo. Visserligen finns rika fyndigheter av vanadin och mangan i regionen men inte på samma ställen som uran.

Naudet har noggrant undersökt kriticiteten i Oklo och beskrivit den i sin bok /15-7/. SKB har, med tillåtelse, översatt delar av boken från franska till engelska /15-8/ och använt materialet för en jämförelse mellan Oklo och förhållandena i ett djupförvar. Redan första gången som kriticitetsrisken undersöktes för ett förvar så refererade man till Oklo /15-9/ och slutsatsen är densamma nu som då; det uppstår ingen kriticitet i ett djupförvar /15-10/.

En speciell grupp (PAIG, Performance Assessment Interface Group) har etablerats inom Okloprojektet för att länka ihop den geovetenskapliga utvärderingen med säkerhetsanalysens behov av underlag. Det är ett välkommet initiativ eftersom första fasen var mer generell till sin karaktär.

## 15.4 Palmottu

Det nya Palmottuprojektet startade i november 1995. Platsen som undersöks är en uranfyndighet vid sjön Palmottu i södra Finland. Uranmalmen bildar en 1–15 m tjock brantstående zon som sträcker sig ner till ca 300 m. Den studeras som en analog till utbränt bränsle i ett förvar i granitiskt berg. Geologi, hydrogeologi, grundvattenkemi, klimat etc liknar det som väntar oss på framtida förvarsplatser i Finland och Sverige. Projektet leds av GTK i Finland med stöd av EU. Utom SKB deltar även ENRESA och BRGM.

Mycket av undersökningarna i Palmottu har utnyttjat de många prospekteringshål i området, men i det nya projektet så har ytterligare undersökningshål borrats med grövre diameter ( $\varnothing 76$ ) som tillåter fler mätningar. Hålen har dessutom placerats så att de skall ge bästa möjliga resultat. TV-loggning har använts liksom radar, spinnermätningar av vattenflöden och hydraultester (enkelhåls- och mellanhåltester). SKB:s ”kemivagn” användes för provtagning och analys av grundvatten. Det har överhuvudtaget varit ett välkommet tillfälle för oss att få testa våra utrustningar för loggning, hydraultester och kemi-mätningar, som var antingen helt nya eller vidareutvecklade sedan förundersökningsfasen på Äspö (1986–1990).

EU begärde att Palmottuprojektet skulle genomföras i två separata faser. Målet för fas 1 var en hydrogeologisk utvärdering och fas 2 skulle sedan gå vidare med upplösning och masstransport. EU beviljade först stöd för enbart fas 1 som skulle vara avrapporterad och godkänd innan stöd kunde lämnas för fas 2. Så har det också blivit; fas 1 är avslutad, rapporterad och godkänd av EU; fas 2 har blivit beviljad och arbetet har påbörjats /15-11/.

## 15.5 Mål och program

### 15.5.1 Okloprojektets mål

Okloprojektet skall pågå till och med 1998. Det kommer sannolikt att ta en god del av 1999 innan rapportering är avklarad och det kan möjligen behövas någon typ av kompletterande utvärdering. För fas 2 av Okloprojektet så har man formulerat ett antal frågor som man vill besvara:

- Vilka fissionsprodukter och slutprodukter från kärnreaktionerna finns alltså kvar?
- Var i zonen, närområdet eller berget har de hållits kvar och i vilken form?
- Vilka retentionsmekanismer har varit aktiva och hur länge?
- Vilket inflytande har de geologiska händelserna haft på retentionen?
- Vilka transportmekanismer har varit aktiva och i så fall när?

De ”geologiska händelserna” som åsyftas är magma som trängt in och påverkat en del av zonerna hydrotermalt samt oxiderande vittring i Bagombé. Utöver uppgiften att besvara frågorna så har man dessutom satt upp följande mål:

- Att ta fram modeller för processer som är viktiga för funktionen hos ett förvar.
- Att pröva dessa modeller med hjälp av data från Oklostudien.
- Att öka kunskapen om de naturliga materialens retentionsförmåga.
- Att förbättra säkerhetsanalysens databaser.

- Att identifiera långsamma processer som skulle kunna påverka radionuklidtransporten.

Det är allmänt och försiktigt formulerade mål som återspeglar en viss osäkerhet över hur långt man kommer att kunna driva undersökningen. Arbetet inom gruppen PAIG ger emellertid förhoppningar om ett användbart resultat till stöd för framtida säkerhetsredovisningar.

### 15.5.2 Palmottuprojektets mål

Palmottuprojektet skall slutrapporteras år 1999. Målen för projektet är följande:

- Ge en kvantitativ beskrivning av uran-toriumförekomsten som ligger i granitiskt berg nära Palmottusjön.
- Granska den relativa betydelsen av processer som kontrollerar vattenflöde i kristallint berg.
- Undersöka och modellberäkna inverkan av geokemisk oxidation och reduktion på rörligheten hos radionuklider i kristallint berg.
- Utredda betydelsen av olika mekanismer för retardation av radionuklider.
- Undersöka betydelsen av upprepade istider på bergets egenskaper.
- Använda kunskap och data från studierna till att utveckla och förfina modeller som används inom funktionsanalys och säkerhetsanalys.

### 15.5.3 Maqarin, Oklo och Palmottu

Programmet naturliga analogier är främst inställt på att genomföra och utvärdera de tre större analogiprojekten där SKB medverkar, dvs Maqarin, Oklo och Palmottu. För Maqarins del så är fas 3 avslutad när slutrapporten är klar och det arbetet pågår. En fortsättning har diskuterats och möjligheterna utreds för närvarande. Oklo- och Palmottuprojekten kommer att bli klara inom nästa treårsperiod, och förhoppningsvis även utvärderingen av resultaten. Sett i ett längre perspektiv så räknar vi med att analogiundersökningar kommer att förbli en del av förberedelsen för kommande säkerhetsredovisningar. Omfattning och inriktning kan däremot förändras en del med tiden.

## 15.6 Kompetensuppbyggnad

De omfattande geovetenskapliga undersökningarna inom ett analogiprojekt bidrar till att samla och träna kompetens för framtida platsundersökningar och platsutvärderingar. Då även geologin är densamma som i Palmottu har vi möjligheter att prova och vidareutveckla våra utrustningar för provtagning och mätning i borrhål. Extrema förhållanden som t ex de hyperalkaliska vattnen i Maqarin och oxiderande vittring i Poços de Caldas och Bagombé breddar vår erfarenhet och gör oss bättre skickade att diskutera olika scenarier där förvarets naturliga miljö påverkas.

## 15.7 Övrigt

Undersökningar av naturliga analogier är inte helt begränsat till programmet Naturliga Analogier. Angränsande program är inte sällan engagerade i delar av analogistudierna som redovisats här t ex Okloprojektet där Bränsle medverkar. På materialsidan finns ett naturligt behov av exempel från naturen. Sålunda stödjer Inkapslingsprojektet studierna av nativ koppar i Hyrköla i södra Finland.

## 16 Paleohydrogeologiskt program

Vi vet att Sverige har varit utsatt för upprepade, omfattande istider under de senaste årmiljonerna. På vetenskapliga grunder kan man visa att landet under ca 80 % av de senaste 700 000 åren varit påverkat av mäktiga inlandsisar. Med stor sannolikhet kan vi även förvänta oss att de största förändringarna under de kommande 100 000 åren är associerade till uppkomsten av inlandsisar /16-1/. De förändringar som kan antas ha störst betydelse för djupförvarets funktion och säkerhet är belastningen från istäcket, djupgående permafrost samt stora smältvattenflöden och höga vattentryck.

Under 1990–91 genomförde SKB och TVO i Finland en gemensam inventering av det internationella kunskapsläget rörande istider /16-2/. Baserat på denna inventering beskrevs ett istidsscenario gällande de kommande 130 000 åren.

Boulton /16-3/ föreslog därefter ett angreppssätt genom vilket SKB/TVO:s istidsscenario kunde vidareutvecklas för att användas för prediktioner av framtida klimatrelaterad påverkan på en förvarsplats. Huvudförslaget i denna rapport innebar användning av en tidsberoende glaciationsmodell som drivs av en beskrivning av den framtida klimatutvecklingen i Sverige. Första steget i en sådan modellering skulle vara att kalibrera modellen mot det förflutna.

År 1996 anordnades inom ramen för den nordiska kärnsäkerhets-organisationen NKS en internationell ”workshop” om klimatstyrda förändringar av bergspänningar, grundvattenflöde och vattenkemi /16-4/. Vi mötet medverkade ett 90-tal forskare och handläggare inom kärnavfallsbranschen. Såväl SKB som SKI var inblandade i förberedelsearbetet och genomförandet av mötet.

### 16.1 Programmets mål

Sedan 1994 bedriver SKB ett paleohydrogeologiskt program med syfte att:

- identifiera och skapa en förståelse för de processer orsakade av framtida klimatförändringar som kan påverka funktionen hos ett djupförvar, och
- skapa ett underlag för funktions- och säkerhetsanalyser av förvaret i ett långt framtida tidsperspektiv.

En detaljerad beskrivning av programmet återfinns i Wikberg et al. /16-5/.

### 16.2 Modellering av glaciationer och deras påverkan på geosfären

Som en grundläggande del i det paleohydrogeologiska programmet har SKB låtit Universitetet i Edinburgh utveckla en numerisk glaciationsmodell med vilken effekterna av förflutna och framtida klimatförändringar kan studeras. Modellen kan simulera tillväxten av en inlandsis som funktion av tiden, baserat på indata i form av temperaturförändringar samt



topografiska och geologiska randvillkor. Utvecklingen av glaciationsmodellen har skett stegvis inom ramen för fem projektfaser med följande inriktningar:

**Projekt 1:** Simulering av den förra glaciationscykeln samt prediktioner av framtida glaciationer längs en transekt genom Sverige /16-6/.

**Projekt 2:** Studier av grundvattenflöde orsakat av en inlandsis. Känslighetsstudier med avseende på olika parametrar ingående i glaciationsmodellen /16-7/.

**Projekt 3:** Förenklingar av glaciationsmodellen. Kalibreringar av modellsimuleringar mot rekonstruktioner av den förra istiden. Modellerings av smältvattenflöden samt bergmekanisk påverkan /16-8/.

**Projekt 4:** Utveckling av en tidsberoende platsspecifik beskrivning av inlandsis och grundvattenflöde för Äspö-området under den förra glaciationscykeln.

**Projekt 5:** Utveckling av teorier för att beskriva hydrogeologiska förhållanden under en inlandsis i tre dimensioner inklusive effekterna av tunnelflöden /16-9/.

I anslutning till dessa projekt vid Universitetet i Edinburgh har även aktiviteter pågått vid Chalmers Tekniska Högskola /16-10/ och hos olika konsultföretag /16-11, 16-12/. Svensson, 1996, har använt programkoden PHOENICS för att studera grundvattenflöde kopplat till en inlandsis över Äspö-området /16-13, 16-14/. Härvid har som indata delvis använts utdata från glaciationsmodellen.

Den glaciationsmodell som utvecklats vid Universitetet i Edinburgh finns idag i flera versioner, både två- och tredimensionella. Genom utförda känslighetsstudier och jämförelser av modellutdata med geologiska observationer och vår allmänna kunskap om den senaste istiden har modellen förenklats i flera avseenden. Olika versioner har olika fördelar och nackdelar och kan användas med olika syften. Beräkningstiderna är idag måttliga även vid användning av ordinära persondatorer.

Modellerings har utförts för ett antal olika fall både gällande förfluten tid och framtid. Utdata i form av tidsberoende serier av olika parametrar, såsom istjocklek, smältvattenflöde, permafrostdjup och vattentryck, har genererats för ett antal platser. Dessa data kan sedan användas som randvillkor för detaljerad modellering av regionala/lokala förhållanden alternativt ge information om skillnader mellan olika platser. Modelleringskoderna skall kunna användas som ett hjälpmedel i kommande funktions- och säkerhetsanalyser /16-15, 16-16/.

Det som driver tillväxt och avsmältning av istäcket är temperaturutvecklingen i luften. Klimatsystemet (och därmed även glaciationsmodellen) är mycket känsligt även för relativt små variationer i temperatur. På grund av att tillgängliga klimatmodeller är osäkra vad avser det framtida klimatet på jorden, innebär detta av nödvändighet att även förutsägelserna av framtida glaciationer blir mycket osäkra. Man kan någorlunda säkert prediktera tidpunkterna för framtida kallperioder. Däremot är det svårt att avgöra vilka av dessa som kommer att leda till ett kontinuerligt istäcke som sträcker sig ner över större delen av Sverige och därmed även över en förvarsplats. Olika glaciationsmodeller som genomförts visar på mycket stora skillnader. Man kan idag t ex inte säga att södra och mellersta Sverige med säkerhet kommer att påverkas överhuvudtaget av en inlandsis under de kommande 100 000 åren.

### 16.3 Hydrogeologiska och hydrokemiska aspekter

Grundvattenflöde i regional skala har modellerats för Äspöområdet /16-13, 16-14/. Härvid har undersökts effekterna av en isfront som passerar fram och tillbaka över en hypotetisk förvaringsplats. Känsligheten för olika antagna konduktivitetfält liksom salinitetsfördelningar har undersökts. Syftet med modelleringarna var också att studera hur djupt det syrerika smältvattnet kan infiltreras liksom hur blandningen sker av grundvatten av olika ålder och ursprung. Denna typ av information är väsentlig för jämförelser med hydrogeokemiska observationer, exempelvis från det 1700 m djupa borrhålet vid Laxemar /16-5/.

Boulton med flera har modellerat det storskaliga mönstret av subglaciellt grundvattenflöde längs en tvådimensionell flödeslinje från norska kusten, genom Sverige och ner till Tyskland /16-7, 16-8/. Dessa simuleringar har varit kopplade till simuleringen av inlandsisens tillväxt och tillbakadragande och glaciationsmodellens känslighet för olika parametrar har undersökts och modellen har därefter förenklats. En viktig fråga är emellertid hur smältvattnet som produceras vid isens botten dräneras. Detta påverkar även vattentryckets variation i tid och rum liksom de subglaciala sedimentationsprocesserna. De tvådimensionella simuleringarna visar en transport av vatten endast vinkelrätt mot iskanten (och i de yttre delarna i form av tunnelflöden om berggrunden inte är tillräckligt genomsläpplig för att kunna ta emot allt det smältvatten som produceras).

Boulton med flera har nyligen utvecklat teorier för tredimensionell dränering under en glaciär eller inlandsis /16-9/. Dessa teorier bygger på att det hydrauliska systemet under glaciären är självorganiserande med en koppling mellan tryckfördelning, kanalflöden och berggrundens vattenförande egenskaper. Grundvattenflödet inom inlandsisens smältvattenzon är därvid i hög grad riktat mot de dränerande tunnlarna, dvs parallellt med iskanten. Teorierna som lagts fram kan förklara många av mönstren och utsträckningarna hos de åssystem vi kan observera idag. Genom studier och mätningar i vår tids stora glaciärer har observationer gjorts som styrker de mönster som teorierna förutser. Inledande modellering av istunnelflöden har även gjorts /16-14/ för Äspöområdet.

### 16.4 Mekaniska aspekter

Närvaron av en inlandsis ger upphov till en kraftigt förhöjd belastning på den underliggande berggrunden, vilket resulterar i en nedtryckning av området under isen och ett förändrat spänningstillstånd relativt nuvarande situation. Vidare uppkommer skjuvspänningar vid isens botten då isen rör sig över sitt underlag varvid underlaget deformeras och eroderas.

Inom det paleohydrogeologiska programmet har tyngdpunkten lagts på modellering av inlandsisens utbredning och egenskaper samt grundvattenflödet under isen. En del studier av mekanisk påverkan har dock även utförts. Nedtryckningen av berggrunden och relativa havsnivåförändringar erhålls som utdata från alla modellsimuleringar med glaciationsmodellen. Vidare har försök gjorts att modellera erosionen och masstransporten och jämförelser har gjorts med fältobservationer av moränmäktighet med relativt gott resultat /16-6/.

En inlandsis som passerar över en plats påverkar både totala och effektiva bergspänningar genom samverkan mellan rörelse, last och vattentryck vid isens botten. Boulton med flera har beskrivit tre principiellt olika orsaker till att mekaniskt brott kan induceras i anslutning till en inlandsis /16-8/:

- genom isrörelsen mot underlaget – skjuvbrott,
- genom belastningen – antingen dragbrott parallellt med den största huvudspänningen eller skjuvbrott på grund av stora deviatorspänningar,
- genom höga vätsketryck – hydraulisk skjuvning, spjälkning och uppspräckning.

Den första av dessa brottyper kan endast inträffa mycket nära markytan, medan de andra teoretiskt kan ske på relativt stora djup. Boulton med flera har nyligen beräknat utbredningen av zoner inom vilka olika brottmekanismer är aktuella för en inlandsis under antagande av bergmekaniska brottkriterier för en homogen bergmassa /16-8/. Emellertid har endast litostatiska bergspänningar antagits, varför de absoluta värdena hos djupangivelserna blir kraftigt överskattade.

Generellt gäller att bergmekaniska brott och deformation orsakade av glaciation/ deglaciation i första hand sker i befintliga strukturer och svaghetszoner. Analytiska beräkningar av hydraulisk spjälkning och skjuvning under en isfront har genomförts /16-17/. Enligt dessa beräkningar kan hydraulisk spjälkning av horisontella/subhorisontella sprickor inträffa några tiotals meter ner i berget under själva inlandsisen. Däremot påpekas att förhållandena vid iskanten kan vara sådana att hydraulisk spjälkning kan ske ner till större djup. Hydrauliskt inducerad skjuvning av befintliga sprickor kan förväntas för relativt måttliga porvattentryck.

## 16.5 Kopplade effekter av glaciationer

De termiska förhållandena under en inlandsis har undersökts grundligt genom omfattande modelleringar. Resultaten visar på att man kan separera tre olika zoner; en isdelarzon där marken är frusen till relativt stora djup och ingen smältning sker vid isens botten, en smältvattenzon inom vilken stora mängder smältvatten produceras och infiltreras, och en iskantzon där marken åter är frusen. Dessutom visar modelleringarna på en omfattande periglacial permafrost som kan sträcka sig hundratals kilometer framför iskanten. Osäkerheterna är dock fortfarande ganska stora om hur djupt ner i berget vi kan förvänta oss permafrost (hundratals meter). Beroende på valda indata erhålls mycket stora variationer. Problemet här är att vi inte har några geologiska eller hydrogeokemiska observationer som berättar något om förhållandena under den senaste istiden. Inga utförda modelleringar tyder dock på att ett djupförvar skall riskera att frysa.

Studier av grundvattenflöde inom den periglaciala permafrostregionen där grundvattnets naturliga strömningsvägar störs, vattnets uppehållstider i berggrunden ökas och kemin förändras, har ej utförts inom det paleohydrogeologiska programmet. Däremot har modellering genomförts som visar på hur glacialt smältvatten kan transporteras ner till stora djup om den vertikala genomsläppligheten hos berggrunden är någorlunda hög. En högre salinitet hos grundvattnet på djupet liksom horisontella sprickzoner kan dock förhindra en sådan djupgående transport. Inledande modellering har även gjorts av hur sammansättningen hos grundvattnet förändras med tiden på grund av olika klimatrelaterade händelser. Resultaten är dock ännu så pass osäkra att någon mer omfattande jämförelse med observerad vattensammansättning ej känns meningsfull. Möjligheterna att på sikt kunna göra detta bedöms emellertid som goda. Detta skulle i så fall kunna erbjuda en metod att testa och eventuellt förbättra glaciationsmodellen för att härigenom kunna skapa större tilltro till övriga utdata.

Boulton med flera har genom sina studier och beräkningar av dräneringsförhållandena hos inlandsisar visat på vikten av tredimensionella modelleringar /16-9/. De lägre vattentrycken som uppkommer längs tunnlarna är även av stor vikt för isens påverkan på berggrundens mekaniska förhållanden. Vad som återstår är att inkludera teorierna för tunneldränering i glaciationsmodellen och att studera de då erhållna hydrauliska och mekaniska effekterna.

De kopplade hydro-mekaniska effekterna av pålastning- avlastning från en inlandsis inklusive höga vätsketryck är idag ofullständigt undersökta. Speciellt svårt är det att bedöma de bergmekaniska konsekvenserna för en bergmassa med komplex sprickstruktur. De ansatser som nyligen gjorts av Boulton med flera är intressanta och har en utvecklingspotential vid antagande av en mer realistisk bergspänningssituation /16-8/. Den typ av modellering av "självreglerande" permeabilitet som föreslås där förloppet högt vätsketryck- inducerat brott- permeabilitetsökning- lägre vätsketryck studeras som en transient process är dock inte realistisk med nuvarande kunskap om spricksystem och bergsprickors mekaniska egenskaper.

De bergmekaniska frågorna har generellt haft en relativt underordnad roll i det genomförda programmet. Förhållandevis enkla studier kan ge en god förståelse för mekanisk påverkan från glaciären /16-17/. Sannolikt krävs dock även kopplade hydrauliska-mekaniska modeller där berggrunden beskrivs som ett nätverk av diskreta sprickor/sprickzoner för att kunna bedöma effekterna på förvarsdjup.

## 16.6 Projekt EQUIP

Målet för projekt EQUIP (Evidence from QUaternary Infills for Paleohydrogeology) är att utröna och testa metoder för att via undersökningar av sprickmineral (kalcit) spåra tidigare rådande hydrokemiska och hydrologiska förhållanden. Deltagare i projektet är Golder Associates (UK) Ltd., British Geological Survey, (med stöd från UK Nirex and HMIP), ANDRA, Posiva, SKB, ENRESA and University of Bristol. Varje deltagare utser en eller flera platser från vilka provmaterial hämtas. SKB använder prov från Äspö. Andra platser som kommer att ingå är Sellafield, Posiva:s undersökningsplatser, ANDRA:s undersökningsplatser m fl. SKB:s förhoppning, och även de övriga deltagarnas, är att få en uppfattning om hur användbara nya analysmetoder är för att spåra tidigare rådande vattenkemiska förhållanden. Dessutom hoppas vi kunna besvara frågan om det glacialvatten som finns på stort djup i Äspö härrör från senaste isavsmältning eller om det har ett långt tidigare ursprung. Projektet planeras pågå i 36 månader och startade i februari 1997.

Genom att på detta sätt få klarhet i tidigare rådande kemiska förhållanden kan man med antagande om kommande klimatförhållanden modellera de framtida grundvattenflödesförhållandena, se PAGEPA.

## 16.7 Projekt PAGEPA

Under 1997 startade EU-projektet PAGEPA (PAleohydrogeology and GEoforecasting for Performance Assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal) med SKB som s k "subcontractor". SKB är i projektet ansvarig för en deluppgift som behandlar hur paleohydrogeologisk information skall användas i säkerhetsanalys. Det treåriga projektet koordineras av Universitetet i Edinburg, UK. Andra deltagare är Chalmers Tekniska Högskola Göteborg, BRGM Frankrike och BGR från Tyskland.

## 17 Djupborrning i Laxemar

### 17.1 Lägesredovisning

I kapitel 7, 8 och 9 behandlas var för sig, kunskapsläget med hänsyn till bergets mekaniska stabilitet, vattenkemiska miljö och förmåga till radionuklidretardation. I ett integrerat, mindre projekt "Djupborrning KLX 02 – Laxemar" har studerats såväl mekaniska, hydrauliska, termiska som kemiska aspekter i fält. Projektet, som genomförts vid sidan av Äspölaboratoriet, initierades under hösten 1992 med målet att bredda kunskaperna om bergets sammansättning och egenskaper på större djup samt att erhålla ny information avseende grundvattnets strömningsmönster och kemiska sammansättning i ett regionalt perspektiv för Äspölaboratoriet.

Projektet har vidare haft delmålen:

- att påvisa olika borrhningstekniska möjligheter för undersökningsborrning till större djup och att demonstrera sådan borrhning till ca 1500 m under markytan,
- att demonstrera metoder för undersökningar i borrhål inom djupintervallet 1000–1500 m.

Borrningen av KLX 02 genomfördes under tiden oktober–november 1992 till 1700 m djup med s k "wire-line teknik". En intakt borrhkärna finns för intervallet 200–1700 m, /17-1/. Efter borrhningen har undersökningsverksamheten omfattat geologisk kartering, mineralogi, geofysiska mätningar, grundvattenkemi och grundvattenhydraulik. En utrustning har modifierats för att mäta bergspänningar på nivåer djupare än 1000 m. Borrhålet ger även väsentliga indata till SKB:s paleohydrogeologiska program och till det program som behandlar det alternativa förvarskonceptet "Djupa hål", se avsnitt 13.2.

Alla hittills genomförda fältundersökningar har nu summerats i en sammanställning /17-2/. Det följande exemplifierar några av resultaten:

- Smålandsgranit utgör 63 % av borrhkärnan. Äspö diorit uppgår till 25 %. Finkornig granit förekommer med mindre än 2 %. Grönstensavsnitt förekommer frekvent mellan 600 och 950 meters djup.
- Fissionsspårsstudier säger att tidigare förekomst av 3000–4000 m mäktiga Devonska sedimentlager förekommit. Dessa lager utgjordes av erosionsprodukter från den då bildade Kaledoniska bergskedjan (fjällkedjan).
- Utifrån de geofysiska undersökningarna är det troligt att vissa uppspruckna partier i KLX02 har kontakt med det andra djupa borrhålet KLX01 i Laxemarområdet. Avståndet är ca 1000 m.
- I borrhålet visar vissa partier, 600–1200 m och 1550–1700 m, en förhöjd sprickfrekvens.
- Bergspänningarna följer ej linjära samband mot djupet. Fyra skilda intervall med spänningsgradienter har identifierats för såväl största som minsta huvudspänning.

- Den största huvudspänningen har riktningen N30°W med få undantag.
- Temperaturgradienten varierar mellan 14,5–17°C/km.
- Transmissivitetstester (enhålstester i 300 m sektioner) visar högre genomsläpplighetsvärden ( $T \gg 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ned till ca 500 m djup. Under denna nivå är värdena en till två storleksordningar lägre.
- Under interferenstesterna mellan KLX 02 och KLX 01 har en hydraulisk kontakt noterats mellan hålen.
- Grundvattenproverna visar två uppenbara vattentyper, /17-3/: 1) ett ytligt bräckvatten, 2) saltlösningar (brines). Övergången sker mellan 800–1100 meters djup.
- Vid hålets botten, på 1700 meters djup, uppgår kloridhalten till ca 50 000 mg/l.

Borrningen och fältundersökningarna har genomförts, inte utan ett flertal praktiska svårigheter, och givit värdefulla erfarenheter inför kommande platsundersökningar. Sammanfattningsvis anser sig SKB ha levt upp till sina övergripande mål.

## 17.2 Mål och program

För den kommande treårsperioden är målet att kartlägga in- och utströmningsförhållanden vid borrhålet KLX 02 i Laxemar.

SKB avser ej att under den kommande treårsperioden genomföra några omfattande fältundersökningar i borrhålet KLX 02. Vissa vattenkemiska provtagningar kan dock komma ifråga.

## 18 Vetenskapsinformation

Förmågan att kommunicera de vetenskapliga resultat som tas fram inom de olika forskningsprogrammen till allmänhet och beslutsfattare blir allt viktigare för att få folklig och politisk acceptans för ett djupförvar. Vi måste också kunna visa att det på ett enkelt sätt går att spåra de fakta som finns presenterade i broschyrer och dylikt tillbaka till källan via populariserade sammanställningar inom olika ämnesområden. Med anledning av detta genomfördes under 1996 och 1997 ett projekt för att på ett populärvetenskapligt sätt beskriva de risker som ett djupförvar för använt kärnbränsle ger upphov till. Under sommaren 1997 inrättades också en funktion för vetenskapsinformation.

### 18.1 Riskprojektet

SKB har inte lyckats med att förmedla en realistisk beskrivning av vilka risker ett djupförvar för använt kärnbränsle skulle innebära för människor och miljö. Överskattade risker och rädsla för orealistiska händelser, såsom kärnsprängningar och transportolyckor, förekommer titt som tätt i den allmänna debatten. Våren 1996 startades därför ett projekt, det så kallade Riskprojektet, med syftet att på ett populärvetenskapligt sätt beskriva det använda kärnbränslets egenskaper och vilka risker som är förknippade med hanteringen av det. Arbetet i projektet pågick under hela 1997 och resulterade i följande rapporter:

- Använt kärnbränsle – Hur farligt är det /18-1/?
- Plutonium – Data egenskaper m m /18-2/.
- Vad betyder en istid för djupförvaret /18-3/?
- Använt kärnbränsle – Barriärernas säkerhetsmässiga betydelse /18-4 /.
- Använt kärnbränsle – Djupförvarets funktion och utveckling /18-5/.
- Använt kärnbränsle – Transporter /18-6 /.
- Farliga ämnen i människans omgivning /18-7/.

Innehållet i de olika rapporterna har därefter populariserats ytterligare en nivå och publicerats som en rad faktablad i SKB:s Fakta om-serie.

### 18.2 Funktionen för vetenskapsinformation

Inom området vetenskapsinformation produceras såväl faktablad som populärvetenskapliga versioner av viktiga rapporter. Tanken är att det skall finnas en spårbarhet bakåt från de fakta som presenteras i faktabladen till de tekniska rapporterna.

Under 1998 kommer faktablad att ges ut som behandlar radioaktivt avfall i andra länder, andra sätt att ta hand om använt kärnbränsle, rivning av kärnkraftverk, plutonium, separation och transmutation, kärnbränslecykeln samt FUD 98.

Under 1999 planeras faktablad om bland annat naturliga analogier, bakterier och säkerhetsanalys. Då fortsätter också arbetet med att vidareutveckla materialet från risk-

projektet. Nyttillkommen kunskap skall sammanställas och redovisas och eventuellt nya områden identifieras.

För att ytterligare underlätta informationsspridningen finns också vissa planer på att starta ett nyhetsbrev under 1999. Målgrupperna är främst forskare, fackpressjournalister och yrkesverksamma inom miljöområdet. Frågan kommer att utredas ytterligare hösten 1998.

### **18.3 Internet**

Vi måste anpassa oss till att allt mer information överförs på elektronisk väg. Antalet personer som har tillgång till och använder Internet ökar explosionsartat. Att bygga ut vår hemsida i syfte att göra den mera informationstät är därför en självklarhet. Arbetet med detta har påbörjats under 1997 och kommer att fortsätta under 1998.

### **18.4 Intern utbildning**

Alla medarbetare på SKB har ett ansvar för att se till att omvärlden kan ta till sig de kunskaper som vi har byggt upp. För att kunna ta detta ansvar måste medarbetarna ges förutsättningarna för att kunna göra det. Ambitionen är därför att ge alla handläggare en grundläggande utbildning i kommunikation. Det rör sig om ett praktiskt inriktat kurspaket med komponenter som rapportskrivning, presentationsteknik, riskkommunikation och medieträning. Satsningen startar under våren 1998 med kurser i att skriva lättfattlig svenska.



# Referenser

## *Kapitel 1*

- 1-1 FUD-program 98  
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk djupförvaring.  
SKB, Stockholm, september 1998
- 1-2 Werme L, 1998  
Konstruktionsförutsättningar för kapseln för använt kärnbränsle.  
SKB rapport R-98-08, Stockholm

## *Kapitel 2*

- 2-1 FUD-program 95  
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning, utveckling och demonstration.  
SKB, Stockholm, september 1995
- 2-2 Skagius K, Ström A, Wiborgh M, 1995  
The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of FEPs in a repository system. Application on the far-field of a deep geological repository for spent fuel.  
SKB Technical Report TR 95-22, Stockholm
- 2-3 Coad P, Yourdon E, 1991  
Object-Oriented Analysis.  
Yordon Press, P T R Prentice-Hall Inc. ISBN 0-13-629981-4
- 2-4 Shlaer S, Mellor J, 1992  
Object Lifecycles; Modelling the World in States.  
Yordon Press, P T R Prentice-Hall Inc. ISBN 0-13-629940-7
- 2-5 SKB, SR 95, 1995  
Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel.  
SKB, Stockholm

## *Kapitel 3*

- 3-1 Werme L, Sellin P, Forsyth R, 1990  
Radiolytically induced oxidation of spent nuclear fuel.  
SKB Technical Report TR 90-08, Stockholm

- 3-2 Karnland O, 1997  
Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions – Correlation between model calculations and experimentally determined data.  
SKB Technical Report TR 97-31, Stockholm
- 3-3 Wieland E, Wanner H, Albinsson Y, Wersin P, Karnland O, 1994  
A surface chemical model of the bentonite-water interface and its implications for modelling the near field chemistry in a repository for spent fuel.  
SKB Technical Report TR 94-26, Stockholm
- 3-4 Bond A, Hoch A, Jones G, Tomczyk A, Wiggin R, Worraker W, 1997  
Assessment of o spent fuel disposal canister – Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component.  
SKB Technical Report TR 97-19, Stockholm
- 3-5 Romero L, Moreno L, Neretnieks I, 1991  
A compartment model for solute transport in the near field of a repository for radioactive waste (Calculations for Pu-239).  
SKB Technical Report TR 91-48, Stockholm
- 3-6 SKB, SR 95, 1995  
Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel.  
SKB, Stockholm
- 3-7 Hartley L, Boghammar A, Grundfelt B, 1997  
Investigation of the large scale regional hydrogeological situation at Beberg.  
SKB Technical Report TR 97-, Stockholm (in press)
- 3-8 Svensson U, 1997  
A regional analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area.  
SKB Technical Report TR 97-09, Stockholm
- 3-9 Boghammar A, Grundfelt B, Hartley L, 1997  
Investigation of the large scale regional hydrogeological situation at Ceberg.  
SKB Technical Report TR 97-21, Stockholm
- 3-10 SKB, 1996  
User's guide to HYDRASTAR 1.5.  
SKB Progress Report U-96-15, Stockholm
- 3-11 Walker D (ed), Eriksson L, Lovius L, 1996  
Analysis of the Äspö LPT2 pumping test via simulation and inverse modelling with HYDRASTAR.  
SKB Technical Report TR 96-23, Stockholm
- 3-12 Walker D, Lovius L, Eriksson L, 1997  
Verification of HYDRASTAR 1.7: Nugget effect in geostatistical simulations.  
SKB Progress Report U-97-22, Stockholm
- 3-13 Gylling B, Moreno L, Neretnieks I, Birgersson L, 1994  
Analysis of LPT2 using the channel network model.  
SKB HRL ICR 94-05, Stockholm

- 3-14 Gylling B, Romero L, Moreno L, Neretnieks I, 1996  
Coupling of the near field release to the far field transport – Using NUCTRAN and CHAN3D.  
SKB Progress Report U-96-02, Stockholm
- 3-15 Dershowitz W, Wallmann P, Shuttle D, Follin S, 1996  
Canister and far-field demonstration of the discrete fracture analysis approach for performance assessment.  
SKB Progress Report U-96-41, Stockholm
- 3-16 Ström A (ed), 1998  
Äspö Modelling Task Force: Key issues in representation of the barrier function of the geosphere as a basis for input to performance assessment.  
SKB International Cooperation Report (in preparation)
- 3-17 Andersson J, Almén K-E, Ericsson L O, Fredriksson A, Karlsson F, Stanfors R, Ström A, 1998  
Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation.  
SKB Technical Report TR 98-02, Stockholm
- 3-18 Ström A, Andersson J, Almén K-E, Ericsson L O, Svemar C, 1998  
Geovetenskapliga värderingsfaktorer och kriterier för platsutvärdering, Lägesrapport augusti 1998.  
SKB Report R-98, Stockholm
- 3-19 Edlund O, 1998  
Summary of biosphere research 1967–1997.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 3-20 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
- 3-21 BIOMOVSI, 1996  
Development of reference biospheres methodology for radioactive waste disposal.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR6, Stockholm
- 3-22 BIOMOVSI, 1996  
Uncertainty and validation: Effect of user interpretation on uncertainty estimates.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR7, Stockholm
- 3-23 BIOMOVSI, 1996  
Biosphere modelling for dose assessments of radioactive waste repositories: Final Report of the Complementary Studies Working Group.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR12, Stockholm
- 3-24 Zach R, 1997  
Nuclear fuel waste management – Biosphere program highlights – 1978 to 1996.  
AECL Report AECL-11811, Pinawa, Manitoba, Canada

- 3-25 Bergström U, Nordlinder S, 1998  
Biosmod – a modularized standard biosphere.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 3-26 Nilsson S, Bergström U, Nordlinder S, 1996  
Modularized standard biosphere.  
Proceedings Intern. Conf. Deep Geol. Disposal of Radioactive Waste, Canada  
Nuclear Society, pp 4-59 – 4-66, Manitoba, Canada
- 3-27 Nordlinder S, Bergström U, 1997  
Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 3-28 Lindborg T, Schüldt R, 1998  
The biosphere at hypothetical Aberg, Beberg and Ceberg – A description and  
evaluation of climate, physical geography, ecology, landuse and environment.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 3-29 Thunholm B, Klein Å, 1998  
Quaternary deposits and groundwater flow at Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 3-30 Kautsky U, Meili M, Bergström U, 1998  
Processer i Biosfären.  
SKB Rapport, Stockholm (manus)
- 3-31 Bergström, U, Nordlinder S, Aquilonius K, 1995  
Assessment model validity document. BIOPATH/PRISM: codes for calculating  
turnover of radionuclides in the biosphere and doses to man.  
SKB Arbetsrapport AR 95-19, Stockholm
- 3-32 Sundblad B, Aggeryd I, 1996  
Long-term redistribution of elements within a swamp area – the natural  
analogue at the island of Äspö.  
Proceedings Intern. Conf. Deep Geol. Disposal of Radioactive Waste, Manitoba,  
Canada
- 3-33 Nordlinder S, Bergström U, 1995  
Osäkerheter i dosberäkningar från förvar av högaktivt avfall.  
SKB Utveckling Project Report U-95-15, Stockholm
- 3-34 Nordlinder S, 1996  
Individual doses from inflow of radionuclides via the groundwater from a major  
fracture zone.  
SKB Utveckling Project Report, U-96-23, Stockholm
- 3-35 Engqvist A, 1997  
Water exchange estimates derived from forcing for the hydraulically coupled  
basins surrounding Äspö island and adjacent coastal water.  
SKB Technical Report TR 97-14, Stockholm

- 3-36 Westman P, 1997  
Saliniteten i Östersjön sedan senaste istiden.  
Kvartärgeologiska Inst., Stockholms Universitet, Stockholm (manus)
- 3-37 VAMP, 1996  
Validation of models using Chernobyl fallout data from southern Finland. Scenario S. Second report of the VAMP Multiple Pathways Assessment Working Group. International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA-TECDOC-904, Vienna
- 3-38 Aggeryd I, Aquilonius K, Landström O, Sundblad B, Tullborg E-L, 1996  
Long-term transfer of elements across the interface of the biosphere and geosphere – The natural analogue at the island of Äspö.  
SKB Utveckling Project Report, U-96-24, Stockholm
- 3-39 BIOMOVSI, 1996  
Model validation studies of water flow and radionuclide transport in vegetated soils using lysimeter data.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI), TR15, Stockholm
- 3-40 Kautsky U, Hedin A, 1998  
Accumulated dose – An upper limit of bio-accumulation effects.  
High-Level radioactive waste management. Proceedings of the 8th Int. Conf. Las Vegas, NA, May 11–14, 1998. American Nuclear Society, pp 486–488

#### **Kapitel 4**

- 4-1 Forsyth R S, Werme L O, 1992  
Spent fuel corrosion and dissolution.  
J. Nucl. Mat. Vol 190, pp 3-19
- 4-2 Werme L O, Spahiu K, 1998  
Direct disposal of spent nuclear fuel: Actinide chemistry in natural waters under reducing and mildly oxidizing conditions.  
J. Metals and Alloys, 1998
- 4-3 Forsyth R S, Eklund U-B, 1995  
Spent nuclear fuel corrosion: The application of ICP-MS to direct actinide analysis.  
SKB Technical Report TR 95-04, Stockholm
- 4-4 Forsyth R S, 1997  
Analysis of radioactive corrosion test specimens by means of ICP-MS. Comparison with earlier methods.  
SKB Technical Report TR 97-11, Stockholm

- 4-5 Spahiu K, Bruno J, 1996  
A selected thermodynamic database for REE to be used in HLNW performance assessment exercises.  
SKB Technical Report TR 95-35, Stockholm
- 4-6 SKI evaluation of SKB R&D Program  
December 1995
- 4-7 Forsyth R S, 1997  
The SKB spent fuel corrosion Programme. An evaluation of results from the experimental programme performed in the Studsvik "hot cell" Laboratory.  
SKB Technical Report TR 97-25, Stockholm
- 4-8 Forsyth R S, 1996  
Spent fuel corrosion: Collected experimental data for the BTC/PTC experiment. Study of the Tc-99 source term for the BWR and PWR reference fuels.  
SKB Arbetsrapport AR 94-07, Stockholm
- 4-9 Forsyth R S, 1995  
Spent nuclear fuel. A review of properties of possible relevance to corrosion processes.  
SKB Technical Report TR 95-23, Stockholm
- 4-10 Skålberg M, Eliasson L, Skarnemark G, Torstenfelt B, Forsyth R, Holmer A, Allard B, 1988  
Diffusion of radionuclides from spent oxide fuel into compacted bentonite.  
Sci. Total Environ. Vol 69, pp 347-365
- 4-11 Albinsson Y, Forsyth R, Skarnemark G, Skålberg M, Torstenfelt B, Werme L O, 1990  
Leaching/migration of UO<sub>2</sub> fuel in compacted bentonite.  
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 176, p 559
- 4-12 Ramebäck H, Albinsson Y, Skålberg M, Werme L O, 1994  
Release and diffusion of <sup>90</sup>Sr from spent UO<sub>2</sub> fuel in bentonite clay.  
Radiochimica Acta, Vol 66/67, pp 475- 478
- 4-13 Ramebäck H, Albinsson Y, Eklund U-B, Skålberg M, Werme L O, 1995  
Analysis of <sup>99</sup>Tc at low concentrations, applied in spent fuel leaching and Tc-diffusion experiments.  
Radiochimica Acta (accepted for publication)
- 4-14 Ramebäck H, Skålberg M, 1998  
Separation of neptunium, plutonium, americium and curium from uranium with di-(2-ethyl hexyl)-phosphoric acid (HDEHP) for radiometric and ICP-MS analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. (accepted for publication)
- 4-15 Ramebäck H, Skålberg M, 1998  
A separation procedure for analysis of <sup>90</sup>Sr, <sup>154</sup>Eu, and the actinides <sup>237</sup>Np, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Am and <sup>244</sup>Cm.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. (submitted for publication)

- 4-16 Ramebäck H, Skålberg M, Eklund U-B, Kjellberg L, Werme L O, 1998  
Mobility of U, Np, Pu, Am and Cm from spent nuclear fuel into bentonite clay.  
Accepted for publication in *Radiochim. Acta*
- 4-17 Albinsson Y, Christiansen B, Engkvist I, Johansson W, 1991  
Transport of actinides and Tc through a bentonite backfill containing small  
quantities of iron or copper.  
*Radiochim. acta*, 52/53, p 283
- 4-18 Sato H, Ashida T, Kohara Y, Yui M, Sasaki N, 1992  
Effect of dry density on diffusion of some radionuclides in compacted sodium  
bentonite.  
*J. Nucl. Sci. Tech.*, 29/9, p 873
- 4-19 Carbol P, Engkvist I, 1997  
Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment.  
SKB Report R-97-13, Stockholm
- 4-20 Eriksen T E, Eklund U-B, Werme L, Bruno J, 1995  
Dissolution of irradiated fuel: a radiolytic mass balance study.  
*J. Nucl. Mater.*, Vol 227, pp 76– 82
- 4-21 SKB Annual Report 1995  
SKB Technical Report TR 95-37, Stockholm, 1996
- 4-22 Christensen H, Sunder S, 1996  
An evaluation of the water layer thickness effective in the oxidation of  $UO_2$  fuel  
due to radiolysis of water.  
*J. Nucl. Mat.*, Vol 238 , pp 70–77
- 4-23 Bruno J, Cera E, Duro L, Eriksen T E, Werme L O, 1996  
A kinetic model for the stability of spent fuel matrix under oxidic conditions.  
*J. Nucl. Mat.*, Vol 238 , pp 110–120
- 4-24 Bruno J, Cera E, Duro L, Eriksen T, Sellin P, Spahiu K, Werme L, 1996  
A kinetic model for the stability of spent fuel matrix under oxidic conditions: Model  
development against experimental evidence.  
MRS Proceedings, Boston
- 4-25 Casas I, de Pablo J, Giménez J, Torrero M E, Bruno J, Cera E, Finch R J, Ewing  
R C, 1996  
Uranium in natural systems. The role of pe, pH and carbonate in the solubility of  
 $UO_2$  and uraninite ( $UO_{2+x}$ ) under nominally reducing conditions.  
Accepted for publication in *Geochim. Cosmochim. Acta*
- 4-26 Casas I, Bruno J, Cera E, Finch R J, Ewing R C, 1997  
Characterisation and dissolution behaviour of a natural sample of becquerelite  
from Shinkolobwe (Zaire).  
*Geochim. Cosmochim. Acta*

- 4-27 E Cera, 1996  
Estudis termodinàmics i cinètics de dissolució de fases naturals d'urani representatives d'un procés d'alteració oxidativa de l'òxid d'urani (IV), Ph.D. Thesis, UAB, Barcelona, Spain
- 4-28 Casas I, Pérez I, Torrero M E, Bruno J, Cera E, Duro L, 1997  
Dissolution studies of synthetic soddyite and uranophane.  
SKB Technical Report TR 97-15, Stockholm
- 4-29 Fuger J, 1994  
Problems in the thermodynamics of the actinides in relation with the back-end of the nuclear fuel cycle.  
J. Nucl. Mater. Vol 201, pp 3–14
- 4-30 Bunji B, Zogovic B, 1958  
Reduction of uranium from carbonate solutions with hydrogen using  $UO_2$  as catalyst. Proceedings of the International Symposium on Peaceful Uses of Atomic Energy, pp 350–355, Stockholm

## **Kapitel 6**

- 6-1 Pusch R, Börgesson L, 1992  
Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts: VDH, KBS-3 and VLH. PASS project on Alternative Systems Study.  
SKB Technical Report TR 92-40, Stockholm
- 6-2 Pedersen K, Karlsson F, 1995  
Investigations of subterranean microorganisms. Their importance for performance assessment of radioactive waste disposal.  
SKB Technical Report TR 95-10, Stockholm
- 6-3 Pusch R (ed), 1997  
The Bentonite and Backfill Handbook, Part 2. Materials and Techniques.  
SKB Arbetsrapport, Stockholm (under publicering)
- 6-4 Pusch R, 1998  
Transport phenomena in smectite clay explained by considering microstructural features. Proc. MRS Workshop on solute transport in compacted bentonite, Davos (under publicering)
- 6-5 Pusch R et al., 1998  
The Bentonite and Backfill Handbook, Part 3. Models for calculation of processes and behavior.  
SKB Arbetsrapport, Stockholm (under publicering)
- 6-6 Börgesson L, Johannesson L-E, 1995  
Thermo-hydro-mechanical modelling of water unsaturated buffer material.  
SKB Arbetsrapport AR 95-32, Stockholm
- 6-7 Johannesson L-E, Börgesson L, Sandén T, 1995  
Pressning av bentonitblock för buffertmaterial.  
SKB Djupförvar Arbetsrapport AR D-95-001, Stockholm



- 6-8 Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, Börgesson L, 1996  
Field test of tunnel backfilling.  
SKB Progress Report PR HRL-96-28, Stockholm
- 6-9 Kalbantner P, Sjöblom R, 1997  
Borttagning av bentonit kring en deponerad kapsel.  
SKB Djupförvar Arbetsrapport AR D-97-22, Stockholm
- 6-10 Pusch R et al., 1985  
Final Report of the Buffer Mass Test – Volume II: test results.  
Stripa Project Technical Report 85-12, SKB, Stockholm
- 6-11 Johannesson L-E, Börgesson L, Sandén T, 1995  
Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial  
production of blocks which are manageable by man.  
SKB Technical Report TR 95-19, Stockholm
- 6-12 Hökmark H, 1994  
Plug design – Numerical study of rock. Mechanical conditions.  
SKB Djupförvar Project Report PR 44-94-024, Stockholm
- 6-13 Muurinen A, Lehtikoinen J, 1997  
Model for diffusion and porewater chemistry.  
24 months progress report. EU project Contr. F14WCT950012
- 6-14 Pusch R, Ranhagen L, Nilden K, 1985.  
Gas migration through MX-80 bentonite.  
Nagra Tech. Rept. NTB-85-36, Wettingen, Schweiz
- 6-15 Tanai K, Kanno T, Gallé C, 1997  
Experimental study of gas permeabilities and breakthrough pressures in clays.  
Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management, XX, Boston,  
Materials Research Society, pp 1003–1010
- 6-16 Horseman S T, Harrington J F, 1997  
Study of gas migration in MX-80 buffer bentonite.  
Nat. Envir. research Council, British Geol. Survey, Report WE/97/7
- 6-17 Horseman S T, Harrington J F, Sellin P, 1997  
Gas migration in Mx80 buffer bentonite. Symposium on the Scientific Basis for  
Nuclear Waste Management, XX, Boston, Materials Research Society, pp 1003–  
1010
- 6-18 Pusch R, 1992  
Chemical interaction of clay buffer materials and concrete.  
SKBF/KBS Arbetsrapport SFR 82-01, Stockholm
- 6-19 Karnland O, Pusch R, Sandén T, 1994  
Concerning bentonite/cement interaction, 4 months tests.  
SKB Arbetsrapport AR 94-22, Stockholm

- 6-20 Couture R A, 1985  
Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite.  
Nature Vol 318, No 6041
- 6-21 Pusch R, Madsen F, 1995  
Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites.  
Clays and Clay Minerals, Vol 43, No 3

## **Kapitel 7**

- 7-1 FUD-program 95, 1995  
Kärnkraftavfalllets behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning, utveckling och demonstration.  
SKB, Stockholm
- 7-2 SKB Annual Report 1995, 1996  
SKB Technical Report TR 95-37, Stockholm
- 7-3 SKB Annual Report 1996, 1997  
SKB Technical Report TR 96-25, Stockholm
- 7-4 SKB Annual Report 1997, 1998  
SKB Technical Report TR 97-, Stockholm (in preparation)
- 7-5 Ahlbom K, Leijon B, Liedholm M, Smellie J, 1992  
Gabbro as a host rock for nuclear waste repository  
SKB Technical Report TR 92-25, Stockholm
- 7-6 Saksa P, Nummela J, 1998  
Geological-structural models used in SR 97. Uncertainty analysis.  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (submitted)
- 7-7 Ericsson L O, Hökmark H, Pusch R, 1998  
Mekaniska processer i geosfären. Förslag till hantering i säkerhetsanalys av djupförvar för använt kärnbränsle.  
SKB rapport R-98-, Stockholm (submitted)
- 7-8 Stephansson O, 1996  
Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media – Mathematical and experimental studies.  
Developments in Geotechnical Engineering, 79. Elsevier, Amsterdam
- 7-9 Leijon B, 1993  
Mechanical properties of fracture zones.  
SKB Technical Report TR 93-19, Stockholm
- 7-10 Larsson S-Å, Tullborg E-L, 1994  
Tectonic regimes in the Baltic shield during the last 1200 Ma – A review  
SKB Technical Report TR 94-05, Stockholm

- 7-11 Muir Wood R, 1993  
A review of the seismotectonics of Sweden  
SKB Technical Report TR 93-13, Stockholm
- 7-12 Muir Wood R, 1995  
Reconstructing the tectonic history of Fennoscandia  
from its margins: The past 100 million years.  
SKB Technical Report TR 95-36, Stockholm
- 7-13 Tullborg E-L, Larson S-Å, Björklund L, Samuelsson L, Stigh J, 1995  
Thermal evidence of Caledonide foreland, molasse sedimentation in  
Fennoscandia.  
SKB Technical Report TR 95-18, Stockholm
- 7-14 Cederbom C, 1997  
Fission track thermochronology applied to Phanerozoic thermotectonic events in  
Central and Southern Sweden.  
Thesis for Licentiate degree A 25, Dep. of Geology, Earth Sciences Centre,  
Göteborg University. Göteborg
- 7-15 Juhlin C, 1997  
Reflection seismic studies on the island of Äspö.  
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-97-09, Stockholm
- 7-16 Ljunggren C, Persson M, 1995  
Beskrivning av databas Bergspänningsmätningar Sverige.  
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-95-017, Stockholm
- 7-17 Ljunggren C, Andersson J, 1998  
Bergspänningsars representativitet – Mätnoggrannhet och naturliga variationer vid  
hydraulisk spräckning och överborrning.  
SveBeFo rapport nr. 37, Stockholm
- 7-18 Ekman L, Ludvigsson J-E, 1998  
Project Deep Drilling KLX 02 – Phase 2 Lilla Laxemar, Oskarshamn.  
Scope of Activities and Results.  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (submitted)
- 7-19 Lindfors U, 1996  
Experimental study of the mechanics of rock joints.  
Licentiate thesis, Div. of Rock Mechanics, Luleå University of Technology, Luleå,  
Sweden
- 7-20 Olsson R, 1997  
The effective stress concept in a jointed rock mass. A literature survey.  
SKB Report R 97-18, Stockholm
- 7-21 La Pointe P, Wallmann P, Thomas A, Follin S, 1997  
A methodology to estimate earthquake effects on fractures intersecting canister  
holes.  
SKB Technical Report TR 97-07, Stockholm

- 7-22 Scherneck H-G, Johansson J M, Elgered G, 1996  
Application of space geodetic techniques for the determination of intraplate deformations and movements in relation with the postglacial rebound of Fennoscandia.  
SKB Technical Report TR 96-19, Stockholm
- 7-23 Påsse T, 1996  
Lake-tilting investigations in southern Sweden.  
SKB Technical Report TR 96-10, Stockholm
- 7-24 Påsse T, 1996  
A mathematical model of the shore level displacement in Fennoscandia.  
SKB Technical Report TR 96-24, Stockholm
- 7-25 Påsse T, 1997  
A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia.  
SKB Technical Report TR 97-28, Stockholm
- 7-26 Maddock R H, Hailwood E A, Rhodes E J, Muir Wood R, 1993  
Direct fault dating trials at the Äspö Hard Rock Laboratory  
SKB Technical Report TR 93-24, Stockholm
- 7-27 Sjöberg R, 1994  
Bedrock caves and fractured rock surfaces in Sweden: occurrence and origin.  
Doctoral Thesis at Stockholm University
- 7-28 Andersson J, Almén K-E, Ericsson L O, Fredriksson A, Karlsson F, Stanfors R, Ström A, 1997  
Parametrar av betydelse att bestämma vid geovetenskaplig platsundersökning.  
SKB Rapport R-97-03, Stockholm
- 7-29 Ericsson L O, Hökmark H, Pusch R, 1998  
Mekaniska processer i geosfären – Förslag till hantering i säkerhetsanalys av djupförvar för använt kärnbränsle.  
SKB rapport R-98-, Stockholm (under tryckning)
- 7-30 Hökmark H, 1991  
Distinct element method modeling of fracture behavior in near-field rock.  
Stripa Project Technical Report TR 91-01, SKB, Stockholm
- 7-31 Jing L, Stephansson O, Tsang C-F, Kautsky F, 1996  
DECOVALEX – Mathematical Models of Coupled THM Processes for Nuclear Waste Repositories. Executive Summary for Phases I, II and III.  
SKI Report 96:58, Stockholm
- 7-32 Nguyen T S, Selvadurai A P S, 1995  
A model for coupled mechanical and hydraulic behavior of a rock joint.  
Proc. 1995 Int. Workshop on Hydro-Thermo-Mechanics of Engineered Clay Barriers and Geological Barriers, AECL, Montreal, Canada

- 7-33 Stephansson O, Jing L, Tsang C-F (eds), 1996  
Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media.  
Developments in Geotechnical Engineering, 79, Elsevier. Amsterdam

## **Kapitel 8**

- 8-1 Andersson P, 1995  
Compilation of tracer tests in fractured rock.  
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-05, Stockholm
- 8-2 Rehbinder G, Isaksson A, 1996  
Large scale flow of groundwater in Swedish bedrock. An analytical calculation.  
SKB Utveckling Project Report U-96-11, Stockholm
- 8-3 Rehbinder G et al., 1997  
On regional flow in Baltic shield – An application of an analytical solution using hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg of SR97.  
SKB Report R-97-17, Stockholm
- 8-4 Wladis D et al., 1997  
Regional characterisation of hydraulic properties of rock using well test data.  
SKB Technical Report TR 97-29, Stockholm
- 8-5 Hakami E, 1995  
Aperture distribution of rock fractures, Doctoral Thesis, TRITA-AMI PHD1003,  
Div. of Engineering Geology, Dep. of Civil and Environmental Engineering,  
Royal Institute of Technology, Stockholm
- 8-6 Larsson E, 1997  
Groundwater flow through a natural fracture – Flow experiments and numerical modelling.  
SKB Technical Report TR 97-16, Stockholm
- 8-7 Holmén J, 1997  
On the flow of groundwater in closed tunnels – Generic hydrogeological modelling of nuclear waste repository, SFL 3-5.  
SKB Technical Report TR 97-10, Stockholm

## **Kapitel 9**

- 9-1 Laaksoharju M, Wallin B, 1997  
Evolution of the groundwater chemistry at the Äspö Hard Rock Laboratory.  
Proceedings of the second Äspö International Geochemistry Workshop, June 6–7,  
1995.  
SKB International Cooperation Report ICR 97-04, Stockholm
- 9-2 Rhén I, Gustafson G, Wikberg P, 1997  
Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on pre-investigations and detailed site characterization.  
SKB Technical Report TR 97-06, Stockholm

- 9-3 Banwart S, 1994  
 Proceedings of The Äspö International Geochemistry Workshop, June 2-3, 1994, Äspö Hard Rock Laboratory.  
 SKB International Cooperation Report ICR 94-13, Stockholm
- 9-4 Laaksoharju M, Skårman C, 1995  
 Groundwater sampling and chemical characterization of the Äspö HRL tunnel in Sweden.  
 SKB Progress Report PR 25-95-29, Stockholm
- 9-5 Laaksoharju M (ed), 1995  
 Sulphate reduction in the Äspö HRL tunnel.  
 SKB Technical Report TR 95-25, Stockholm
- 9-6 Smellie J A T, Laaksoharju M, 1992  
 The Äspö Hard Rock Laboratory. Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions.  
 SKB Technical Report TR 92-31, Stockholm
- 9-7 Svensson U, 1997  
 A regional analyses of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area.  
 SKB Technical Report TR 97-09, Stockholm
- 9-8 Skårman C, Laaksoharju M, 1998  
 Cross-predictin of the groundwater chemistry at the SKB sites in Sweden.  
 SKB Rapport R-98-01, Stockholm
- 9-9 AECL, 1994  
 Environmental Impact Statement on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste.  
 AECL-10711, COG-93-1
- 9-10 Frapé S K, Fritz P, 1987  
 Geochemical trends for groundwaters from the Canadian shield.  
 In: Fritz P and Frapé S K, Saline water and gases in crystalline rocks. Geol. Assoc. of Canada Spec. Pap., pp 33:19-38
- 9-11 Lampén, 1992  
 Saline groundwater in crystalline bedrock – a litterature study.  
 YJT 92-23, Helsinki, Finland
- 9-12 Viani B, Bruton C, 1997  
 Assessing the role of cation exchange in Laaksoharju and Wallin, 1997.  
 SKB International Cooperation Report ICR 97-04, Stockholm
- 9-13 Stumm W, Morgan J, 1981  
 Aquatic Chemistry, 2nd ed. Wiley Interscience Publishers
- 9-14 Toulhoat P, Beaucaire C, Michard G, Ouzounian G, 1992  
 Chemical Evolution of Deep Groundwater in Granites, Information Acquired from Natural Systems. Paleohydrogeological Methods and their Applications. Proceedings from an NEA workshop 9–10 November, 1992

- 9-15 Banwart S (ed), 1995  
The Äspö redox investigations in block scale. Project summary and implications for repository performance assessment.  
SKB Technical Report TR 95-26, Stockholm
- 9-16 Malmström M, Banwart S, Duro L, Wersin P, Bruno J, 1995  
Biotite and Chlorite weathering at 25°C.  
SKB Technical Report TR 95-01, Stockholm
- 9-17 Pirhonen V, Pitkänen P, 1991  
Redox capacity of crystalline rocks. Laboratory studies under 100 bar oxygen gas pressure.  
SKB Technical Report TR 91-55, Stockholm
- 9-18 Banwart S, Laaksoharju M, Skärman C, Gustafsson E, Pitkänen P, Snellman M, Landström O, Aggeryd I, Mathiasson L, Sundblad B, Tullborg E-L, Wallin B, Pettersson C, Pedersen K, Arlinger J, Jahromi N, Ekendahl S, Hallbeck L, Degueudre C, Malmström M, 1995  
The Redox experiment in block scale. Final reporting of results from the Three Year Project.  
SKB Progress Report PR 25-95-06, Stockholm
- 9-19 Laaksoharju M, Vuorinen U, Snellman M, Allard B, Pettersson C, Helenius J, Hinkkanen H, 1993  
Colloids or artefacts? A TVO/SKB co-operation project in Olkiluota, Finland.  
SKB Technical Report TR 93-32, Stockholm
- 9-20 Tullborg E-L, Wallin B, Landström O, 1991  
Hydrogeochemical studies of fracture minerals from water conducting fractures and deep groundwaters at Äspö.  
SKB Progress Report PR 25-90-01, Stockholm
- 9-21 Landström O, Tullborg E-L, 1995  
Interactions of trace elements with fracture filling minerals from the Äspö Hard Rock Laboratory.  
SKB Technical Report TR 95-13, Stockholm
- 9-22 Wersin P, Bruno J, Laaksoharju M, 1994  
The implication of soil acidification on a future HLW repository.  
SKB Technical Report TR 94-31, Stockholm

## **Kapitel 10**

- 10-1 Rydberg J, 1996  
Hydrophilic actinide complexation studied by solvent extraction radiotracer technique.  
SKB Technical Report TR 96-17, Stockholm
- 10-2 Cui D, Eriksen T, 1996  
Reduction of Tc(VII) and Np(V) in solution by ferrous iron. A laboratory study of heterogeneous redox processes.  
SKB Technical Report TR 96-03, Stockholm

- 10-3 Cui D, 1996  
Sorption processes and solubilities of radionuclides in deep granite fracture systems.  
Doctoral thesis, Dept of Nuclear Chemistry, Royal Institute of Technology, Stockholm
- 10-4 Rundberg R, Albinsson Y, 1997  
Adsorption isotherms for the sorption of iodate and neptunium(V) onto goethite. In Proceedings of the Fifth International Conference on the Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Migration '95, Saint-Malo, France, September 10-15
- 10-5 Jakobsson A-M, Rundberg R, 1997  
Uranyl sorption onto alumina.  
Materials Research Society Symposium, Proceedings Vol 465, pp 797-804
- 10-6 Jakobsson A-M, Albinsson Y, 1998  
Sorption of  $\text{NpO}_2^+$ ,  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Th}^{4+}$  onto  $\text{TiO}_2$ .  
Submitted to Radiochimica Acta
- 10-7 Ohlsson Y, Neretnieks I, 1995  
Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues.  
SKB Technical Report TR 95-12, Stockholm
- 10-8 Eriksen T E, Jansson M, 1996  
Diffusion of I<sup>-</sup>, Cs<sup>+</sup> and Sr<sup>2+</sup> in compacted bentonite. Anion exclusion and surface diffusion.  
SKB Technical Report TR 96-16, Stockholm
- 10-9 Carbol P, Engkvist I, 1997  
Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment.  
SKB Report R-97-13, Stockholm
- 10-10 Ohlsson Y, Neretnieks I, 1997  
Diffusion data in granite. Recommended values.  
SKB Technical Report TR 97-20, Stockholm
- 10-11 Yu J-W, Neretnieks I, 1997  
Diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite.  
SKB Technical Report TR 97-12, Stockholm
- 10-12 Laaksoharju M, Degueldre C, Skårman Ch, 1995  
Studies of colloids and their importance for repository performance assessment.  
SKB Technical Report TR 95-24, Stockholm
- 10-13 Neretnieks I, Ernstson M-L, 1995  
A note on radionuclide transport by gas bubbles.  
Paper presented at the Fifth International Conference on the Behaviour of Actinide and Fission Products in the Geosphere, Migration '95, Saint Malo, France, September 10-15



- 10-14 Pedersen K, Karlsson F, 1995  
Investigation of subterranean micro-organisms. Their importance for performance assessment of radioactive waste disposal.  
SKB Technical Report TR 95-10, Stockholm
- 10-15 Stroes-Gascoyne S, Pedersen K, Daumas S, Hamon C J, Haveman S A, Delaney T L, Ekendahl S, Jahromi N, Arlinger J, Hallbeck L, Dekeyser K, 1996  
Microbial analysis of the buffer/container experiment at AECL's Underground Research Laboratory.  
SKB Technical Report TR 96-02, Stockholm
- 10-16 Pedersen K, Arlinger J, Bruetsch R, Degueudre C, Hallbeck L, Laaksoharju M, Lutz Th, Pettersson C, 1996  
Bacteria, colloids and organic carbon in groundwater at the Bangombé site in the Oklo area.  
SKB Technical Report TR 96-01, Stockholm
- 10-17 Ekendahl S, 1996  
Deep subsurface ecosystems. Numbers, activity and diversity of groundwater bacteria in Swedish granitic rock.  
Doctoral thesis, Dept of General and Marine Microbiology, Göteborg University.
- 10-18 Pedersen K, Motamedi M, Karnland O, 1995  
Survival of bacteria in nuclear waste buffer materials. The influence of nutrients, temperature and water activity.  
SKB Technical Report TR 95-35, Stockholm
- 10-19 Pedersen K, 1997  
Investigation of subterranean micro-organisms and their importance for performance assessment of radioactive waste disposal.  
SKB Technical Report TR 97-22, Stockholm
- 10-20 Naturvårdsverket, 1998  
Slutförvar av kvicksilver.  
Huvudrapport 4752, Naturvårdsverket Förlag, Stockholm

## ***Kapitel 11***

- 11-1 Edlund, 1998  
Summary of biosphere research 1967–1997.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 11-2 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
- 11-3 BIOMOVSI, 1996  
Development of reference biospheres methodology for radioactive waste disposal.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR6, Stockholm

- 11-4 BIOMOVSI, 1996  
Uncertainty and validation: Effect of user interpretation on uncertainty estimates.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR7, Stockholm
- 11-5 BIOMOVSI, 1996  
Biosphere modelling for dose assessments of radioactive waste repositories: Final report of the complementary studies working group.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR12, Stockholm
- 11-6 Bergström U, Nordlinder S, 1998  
Biosmod a modularized standard biosphere.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 11-7 Zach R, 1997  
Nuclear fuel waste management – Biosphere program highlights – 1978 to 1996.  
AECL Report AECL-11811, Pinawa, Manitoba, Canada
- 11-8 SSI, 1998  
Statens Strålskyddsinstitutets föreskrifter om hantering av radioaktivt avfall vid kärntekniska anläggningar. Förhandsremiss.  
SSI, Stockholm
- 11-9 Fitz H C, DeBellevue E B, Costanza R, Boumans R, Maxwell T, Wainger L, Sklar F H, 1996  
Development of a general ecosystem model (GEM) for a range of scales and ecosystems.  
Ecol. Modeling, Vol 88, pp 263–295
- 11-10 Gilek M, Björk M, Broman B, Kautsky N, Kautsky U, Näf C, 1997  
The role of the blue mussel *Mytilus edulis* L, in the cycling of hydrophobic organic contaminants in the Baltic proper.  
Ambio, Vol 26, pp 202–209
- 11-11 Nilsson S, Bergström U, Nordlinder S, 1996  
Modularized standard biosphere. Proceedings Intern. Conf. Deep Geol. Disposal of Radioactive Waste, Manitoba, Canada, Canada Nuclear Society, pp 4-59 – 4-66
- 11-12 Nordlinder S, Bergström U, 1997  
Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg Beberg and Ceberg.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 11-13 Kautsky U, Meili M, Bergström U, 1998  
Processer i Biosfären.  
SKB Rapport, Stockholm (manus)
- 11-14 Lindborg T, Schüldt R, 1998  
The biosphere at hypothetical Aberg, Beberg and Ceberg – a description and evaluation of climate, physical geography, ecology, land use and environment.  
SKB Report, Stockholm (manus)

- 11-15 Thunholm B, Klein Å, 1998  
Quaternary deposits and groundwater flow at Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB Report, Stockholm (manus)
- 11-16 Engqvist A, 1997  
Water exchange estimates derived from forcing for the hydraulically coupled  
basins surrounding Äspö island and adjacent coastal water.  
SKB Technical Report TR 97-14, Stockholm
- 11-17 Avila R, Moberg L, Hubbard L, 1998  
Modelling of radionuclide migration in forest ecosystems. A literature review.  
SSI report 98:07, Stockholm
- 11-18 BIOMOVSH, 1996  
Model validation studies of water flow and radionuclide transport in vegetated  
soils using lysimeter data.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR15, Stockholm
- 11-19 Aggeryd I, Aquilonius K, Landström O, Sundblad B, Tullborg E-L, 1996  
Long-term transfer of elements across the interface of the biosphere and  
geosphere – The natural analogue at the island of Äspö.  
SKB Utveckling Project Report U-96-24, Stockholm
- 11-20 Aggeryd I, Aquilonius K, Sundblad B, 1996  
Biosphere-geosphere interactions. Possible implications for the safety analysis.  
ECOSAFE Studsvik, Nyköping (draft)
- 11-21 Sundblad B, Aggeryd I, 1996  
Long-term redistribution of elements within a swamp area – The natural analogue  
at the island of Äspö. Proceedings Intern. Conf. Deep Geol. Disposal of  
Radioactive Waste, Manitoba, Canada.  
Canada Nuclear Society, pp 4-99 – 4-105
- 11-22 Konhauser KO, Schultze-Lam S, Ferris F G, Fyfe W S, Longstaffe F J, Beveridge  
T J, 1994  
Mineral precipitation by epilithic biofilms in the Speed River, Ontario, Canada.  
Applied and Environmental Microbiology, Vol 60, pp 549–553
- 11-23 Ferris F G, Fratton C M, Gerits J P, Schultze-Lam S, Sherwood Lollar B, 1995  
Microbial precipitation of a strontium calcite phase at a groundwater discharge  
zone near Rock Creek, British Columbia, Canada.  
Geomicrobiology Journal, Vol 13, pp 57–67
- 11-24 Pässe T, 1997  
A mathematical model of past, present and future shore level displacement in  
Fennoscandia.  
SKB Technical Report TR 97-28, Stockholm
- 11-25 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 Report S/97/009, Oxfordshire, United Kingdom

- 11-26 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 Utveckling Progress Report U-96-19, Stockholm
- 11-27 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 ky BP to 130 ky AP).  
Univ. Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium. Scientific report 1996/1
- 11-28 Westman P, 1997  
Saliniteten i Östersjön sedan senaste istiden.  
Kvartärgeologiska Inst., Stockholms Universitet, Stockholm (manus)
- 11-29 Stigebrandt A, 1983  
A model for the exchange of water and salt between the Baltic and the Skagerrack.  
J. Phys. Oceano, Vol 13, No 3, pp 411–427
- 11-30 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 Technical Report TR 98-, Stockholm (draft)
- 11-31 Holmgren K, Karlén W, 1998  
Late quaternary changes in climate.  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (manus)
- 11-32 Vassiljev J, 1997  
Simulating the paleorecord of northern European lakes using a coupled lake-catchment model.  
Dept. Quaternary Geology, Lundqua Thesis, Vol 41, pp 19+5
- 11-33 Gaillard M J, Karlén W, Kullman L, Mapny M, 1998  
North-South European transect of Holocene paleoclimatic proxy records from northern Scandinavia to the Jura mountains, France: a review and correlation of glacier, tree-limit and lake-level data (manus)
- 11-34 BIOMOVSI, 1996  
Effect of Model Complexity on Uncertainty Estimates.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR16, Stockholm
- 11-35 BIOMOVSI, 1996  
Validation Test for Carbon-14 Migration and Accumulation in a Canadian Shield Lake.  
Swedish Radiation Protection Institute (SSI) TR14, Stockholm
- 11-36 Bergström U, Nordlinder S, Aquilonius K, 1995  
Assessment model validity document. BIOPATH/PRISM: codes for calculating turnover of radionuclides in the biosphere and doses to man.  
SKB Arbetsrapport AR 95-19, Stockholm

- 11-37 Nordlinder S, Bergström U, 1995  
Osäkerheter i dosberäkningar från förvar av högaktivt avfall.  
SKB Utveckling Project Report AR 95-15, Stockholm
- 11-38 Nordlinder S, 1996  
Individual doses from inflow of radionuclides via the groundwater from a major fracture zone.  
SKB Utveckling Project Report U-96-23, Stockholm
- 11-39 VAMP, 1996  
Validation of models using Chernobyl fallout data from southern Finland. Scenario S. Second report of the VAMP Multiple Pathways Assessment Working Group.  
International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-904, Vienna

## **Kapitel 12**

- 12-1 Wiborgh M (ed), 1995  
Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste.  
SKB Technical Report TR 95-03, Stockholm
- 12-2 Forsgren E, Lange E, Larsson H, 1996  
SFL 3-5. Layoutstudie.  
SKB Arbetsrapport AR-D-96-016, Stockholm
- 12-3 Holmén J, 1997  
On the flow of groundwater in closed tunnels. Generic hydrogeological modelling of the nuclear waste repository, SFL 3-5.  
Doctoral thesis at Uppsala University, Earth Science Dept., Uppsala.  
SKB Technical Report TR 97-10, Stockholm
- 12-4 Romero L, Moreno L, Neretnieks I, 1995  
Fast multiple path model to calculate radionuclide release from the near field of a repository.  
Nuclear Technology, Vol 112, p 89
- 12-5 Romero L, Moreno L, Neretnieks I, 1995  
Release calculations in the SFL 3-5 repositories. Some calculations verifying the model NUCTRAN.  
SKB Arbetsrapport AR 95-47, Stockholm
- 12-6 Lagerblad B, Trägårdh J, 1994  
Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear repository.  
SKB Technical Report TR 95-21, Stockholm
- 12-7 Engkvist I, Albinsson Y, Johansson-Engkvist W, 1996  
The long-term stability of cement – Leaching tests.  
SKB Technical Report TR 96-09, Stockholm

- 12-8 Holgersson S, Albinsson Y, Allard B, Borén H, Pavasars I, Engkvist I, 1998  
Effects of gluco-isosaccharinate on Cs, Ni and Pm sorption onto, and diffusion in cement.  
Radiochimica Acta (to be published)
- 12-9 Holgersson S, Albinsson Y, Engkvist I, Rochelle Ch, Pierce J, 1998  
Interactions of cement pore fluids with host rock and the effects on HTO, Na and Cs diffusion.  
Radiochimica Acta (to be published)

### **Kapitel 13**

- 13-1 Steinberg M, Watsak G, Manowitz B, 1964  
Neutron burning of long-lived fission products for waste disposal.  
BNL-8558, USA
- 13-2 Croff A G, 1990  
Historical perspective on partitioning and transmutation, in C W Forsberg et al.:  
Historical perspective, economic analysis and regulatory analysis of the impacts of  
waste partitioning-transmutation on the disposal of radioactive wastes.  
ORNL/TM-11650, USA
- 13-3 Jameson R A (ed), 1991  
Proceedings of the specialist meeting on accelerator-driven transmutation  
technology for radwaste and other applications, Saltsjöbaden, Sweden 24-28 June  
1991.  
SKN Report No 54, Stockholm
- 13-4 FUD-program 92, 1992  
Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveck-  
ling, demonstration och övriga åtgärder.  
SKB, Stockholm
- 13-5 Skålberg M, Liljenzin J O, 1992  
Partitioning and transmutation. A review of the current state of the art.  
SKB Technical Report TR 92-19, Stockholm
- 13-6 Gudowski W, Pettersson K, Thedéen T, 1993  
Accelerator transmutation of wastes (ATW) – Prospects and safety.  
SKB Technical Report TR 93-23, Stockholm
- 13-7 Skålberg M, Liljenzin J O, 1993  
Partitioning and transmutation, the state of the art.  
Nuclear Engineering International, Vol 38, No 463, pp 30–33
- 13-8 Skålberg M et al., 1995  
Partitioning and transmutation (P&T) 1995. A review of the current state of the  
art.  
SKB Technical Report TR 95-32, Stockholm

- 13-9 Enarsson Å et al., 1998  
Separation och transmutation (S&T) 1997. En genomgång av nuläget.  
SKB rapport 98 (skrivs)
- 13-10 SKB Annual Report 1993, 1994  
SKB Technical Report TR 93-34, Chapter 18, Stockholm
- 13-11 SKB Annual Report 1994, 1995  
SKB Technical Report TR 94-33, Chapter 18, Stockholm
- 13-12 SKB Annual Report 1995, 1996  
SKB Technical Report TR 95-37, Stockholm
- 13-13 SKB Annual Report 1996, 1997  
SKB Technical Report TR 96-25, Chapter 18, Stockholm
- 13-14 SKB Annual Report 1997, 1998  
SKB Technical Report TR 97-, Stockholm (in progress)
- 13-15 Salvatores M, 1997  
Nuclear Engineering Perspective on Accelerator-Driven Transmutation. Föredrag  
vid IVA-konferens om WHY research on accelerator-driven transmutation  
technology i Stockholm
- 13-16 Rubbia C et al.  
Fast neutron incineration in the energy amplifier as an alternative to geologic  
storage: The case of Spain.  
CERN/LHC/97-01 (EET)
- 13-17 NEA-uttalande om transmutation.
- 13-18 Venneri L et al., 1998  
Presentation of ATW by LANL at MIT, USA, Jan 15-16
- 13-19 US National Research Council Committee, 1996  
Nuclear wastes. Technologies for separations and transmutation.  
National Academy Press, Washington D C
- 13-20 Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Leijon B, Ljunggren C,  
Beswick J, 1998  
The Very Deep Hole concept – Geoscientific appraisal of conditions at great  
depth  
SKB Technical Report TR 98-05, Stockholm
- 13-21 Project Alternative Systems Study (PASS)  
Final Report  
SKB Technical Report TR 93-04, Stockholm

## **Kapitel 14**

- 14-1 FoU-program 86, 1986  
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder.  
SKB, Stockholm
- 14-2 Gustafson G, Liedholm M, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P, 1991  
Äspö Hard Rock Laboratory. Predictions prior to excavation and the process of their validation.  
SKB Technical Report TR 91-23, Stockholm
- 14-3 FUD-program 92, 1992  
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Underlagsrapport  
Äspölaboratoriet.  
SKB, Stockholm
- 14-4 FUD-program 95, 1995  
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning, utveckling och demonstration.  
SKB, Stockholm
- 14-5 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 1994, 1995  
SKB Technical Report TR 95-07, Stockholm
- 14-6 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 1995, 1996  
SKB Technical Report TR 96-06, Stockholm
- 14-7 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 1996, 1997  
SKB Technical Report TR 97-08, Stockholm
- 14-8 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 1997, 1998  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (in progress)
- 14-9 Almén K, Zellman O, 1991  
Äspö Hard Rock Laboratory. Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986–1990.  
SKB Technical Report TR 91-21, Stockholm
- 14-10 Wikberg P (ed), Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, 1991  
Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and conceptual modelling based on the pre-investigations.  
SKB Technical Report TR 91-22, Stockholm
- 14-11 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 Technical Report TR 92-31, Stockholm



- 14-12 Stanfors R, Erlström M, Markström I, 1997  
 Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/1. Overview of site characterization 1986–1995.  
 SKB Technical Report TR 97-02, Stockholm
- 14-13 Rhén I (ed), Bäckblom G (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997  
 Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/2. results from pre-investigations and detailed site characterization. Summary report.  
 SKB Technical Report TR 97-03, Stockholm
- 14-14 Stanfors R, Olsson P, Stille H, 1997  
 Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of predictions and observations.  
 Geology and mechanical stability.  
 SKB Technical Report TR 97-04, Stockholm
- 14-15 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.  
 Geohydrology, groundwater chemistry and transport of solutes.  
 SKB Technical Report TR 97-05, Stockholm
- 14-16 Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997  
 Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995.  
 SKB Technical Report TR 97-06, Stockholm
- 14-17 Almén K-E, Olsson P, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P, 1994  
 Äspö Hard Rock Laboratory – Feasibility and usefulness of site investigation methods. Experiences from the pre-investigation phase.  
 SKB Technical Report TR 94-24, Stockholm
- 14-18 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 Technical Report TR 97-30, Stockholm
- 14-19 Svensson U, 1994  
 Flow, pressure and salinity distributions around planned experimental sites at the Äspö Hard Rock Laboratory.  
 SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-11, Stockholm
- 14-20 Svensson U, 1994  
 Calculation of pressure, flow and salinity fields using measured inflow to the tunnel.  
 SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-27, Stockholm
- 14-21 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 International Cooperation Report ICR 95-05, Stockholm

- 14-22 Gustafson G, Bossart P, 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 International Cooperation Report ICR 97-06, Stockholm
- 14-23 Mazurek M, Bossart P, Eliasson T, 1997  
Classification and characterization of water-conducting features at Äspö: Results of investigations on the outcrop scale. SKB International Cooperation Report ICR 97-01, Stockholm
- 14-24 Grenthe I, Stumm W, Laaksoharju M, Nilsson A-C, Wikberg P, 1992  
Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems. Chemical Geology, 98, 131
- 14-25 Banwart S (ed), 1995  
The Äspö redox investigations in block scale. Project summary and implications for repository performance assessment. SKB Technical Report TR 95-26, Stockholm
- 14-26 Rivas Perez J A, 1996  
REDOX experiment in the detailed scale (REX). Task 5.1 Laboratory investigations. SKB Progress Report PR HRL-97-08, Stockholm
- 14-27 Jarsjö J, Geller J, 1996  
Groundwater degassing: Laboratory experiments in rock fracture replicas with radial flow. SKB Progress Report PR HRL-96-12, Stockholm
- 14-28 Jarsjö J, Destouni G, 1997  
Conditions for fracture transmissivity reduction due to degassing of groundwater: Analytical expressions, numerical simulations and analysis of laboratory and field data. SKB Progress Report PR HRL-97-03, Stockholm
- 14-29 Geller J T, Jarsjö J, 1995  
Groundwater degassing and two-phase flow: Pilot hole test report. SKB International Cooperation Report ICR 95-03, Stockholm
- 14-30 Jarsjö J, Destouni G, 1997. Groundwater degassing: Pilot injection – withdrawal field test with gassaturated water. SKB Progress Report PR HRL-97-02, Stockholm
- 14-31 Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, Börgesson L, 1996  
Field test of tunnel backfilling. SKB Progress Report PR HRL-96-28, Stockholm
- 14-32 Börgesson L, Johannesson L-E, Sandén T, 1996  
Backfill materials based on crushed rock. Geotechnical properties determined in laboratory. SKB Progress Report PR HRL-96-15, Stockholm

- 14-33 Birgersson L, Widen H, Ågren T, Neretnieks I, Moreno L, 1993  
Scoping calculations for the Matrix Diffusion Experiment.  
SKB International Cooperation Report ICR 93-03, Stockholm
- 14-34 Nordqvist R, Gustafsson E, Andersson P, 1993  
Scoping calculations for the Multiple Well Tracer Experiment – efficient design  
for identifying transport processes.  
SKB International Cooperation Report ICR 93-04, Stockholm
- 14-35 Moreno L, Neretnieks I, 1994  
Scoping calculations for the Multiple Well Tracer Experiment using a variable  
aperture model.  
SKB International Cooperation Report ICR 94-01, Stockholm
- 14-36 Svensson U, 1994  
The Multiple Well Tracer Experiment – Scoping calculations.  
SKB International Cooperation Report ICR 94-03, Stockholm
- 14-37 Selroos J-O, Winberg A, Cvetcovic V, 1994  
Design constraints and process discrimination for the Detailed Scale Tracer  
Experiments at Äspö – Multiple Well Tracer Experiment and Matrix Diffusion  
Experiment.  
SKB International Cooperation Report ICR 94-04, Stockholm
- 14-38 Tanaka Y, Hasegawa T, Kawanishi M, 1997  
Numerical analysis with FEGM/FERM for TRUE-1 non-sorbing tracer tests.  
SKB International Cooperation Report ICR 97-07, Stockholm
- 14-39 Gylling B, Khademi B, Moreno L, 1998  
Modelling of the Tracer Retention Understanding Experiment Task 4C-D using  
the channel network model.  
SKB International Cooperation Report ICR 98-01, Stockholm
- 14-40 Wikberg P, 1998  
Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Plan  
for Modelling Task # 5: Impact of the tunnel construction on the groundwater  
system at Äspö, a hydrological-hydrochemical model assessment exercise.  
SKB Progress Report PR HRL-98-07, Stockholm
- 14-41 Patel S, Dahlström L-O, Stenberg L, 1997  
Characterisation of the rock mass in the prototype repository at Äspö HRL  
stage 1.  
SKB Progress Report PR HRL-97-24, Stockholm
- 14-42 Myrvang A M, 1997  
Evaluation of in-situ rock stress measurements at the ZEDEX test area.  
SKB Progress Report PR HRL-97-22, Stockholm
- 14-43 Nilsson A, 1997  
Fracture mapping and cross section measurement with laser scanner in the TBM-  
and ZEDEX tunnels.  
SKB Progress Report PR HRL-97-18, Stockholm

- 14-44 Bäckblom G, Olsson O, 1994  
 Äspö Hard Rock Laboratory. Program for tracer retention understanding experiments.  
 SKB Progress Report PR 25-94-24, Stockholm
- 14-45 Winberg A, 1994  
 Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE). Test plan for the First TRUE Stage.  
 SKB Progress Report PR 25-94-35, Stockholm
- 14-46 Winberg A, Andersson P, Hermanson J, Stenberg L, 1996  
 Result of the Select project. Investigation programme for selection of experimental sites for the operational phase.  
 SKB Progress Report PR HRL-96-01, Stockholm
- 14-47 Andersson P, 1996  
 TRUE 1st stage tracer test program. Experimental data and preliminary evaluation of the TRUE-1 radially converging tracer test (RC-1).  
 SKB Progress Report PR HRL-96-24, Stockholm
- 14-48 Olsson O, Winberg A, 1996  
 The Äspö TRUE experiments.  
 SKB Progress Report PR HRL-96-27, Stockholm
- 14-49 Andersson P, Nordqvist R, Jönsson S, 1997  
 TRUE 1st Stage Tracer Test Program. Experimental data and preliminary evaluation of the TRUE-1 dipole tracer tests (DP-1–DP-4).  
 SKB Progress Report PR HRL-97-13, Stockholm
- 14-50 Andersson P, Jönsson S, 1997  
 TRUE 1st stage tracer test programme. Complementary tracer tests (RC-2, DP-5, DP-6). Experimental description and evaluation.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-23, Stockholm
- 14-51 Andersson P, Byegård J, Cvetkovic V, Johansson H, Nordqvist R, Selroos J-O, Winberg A, 1997  
 Experimental plan for tests with sorbing tracers at the TRUE-1 site.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-07, Stockholm
- 14-52 Ström A (ed), 1996  
 Äspö Task force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Summary of the predicitive modelling for the RC-1 tracer experiments, Task No 4C.  
 SKB Progress Report PR HRL-96-23, Stockholm
- 14-53 Ström A, 1997  
 Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Proceedings of the 9th meeting in Cherbourg, France, February 4–6, 1997.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-10, Stockholm

- 14-54 Ström A, 1997  
 Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes.  
 Proceedings of the 10th meeting in Kamaishi, Japan, November 11–13, 1997.  
 SKB Progress Report PR HRL-98-01, Stockholm
- 14-55 Johansson H, Siitari-Kauppi M, Skålberg M, Tullborg E-L, 1998  
 Diffusion pathways in crystalline rock – Examples from Äspö-diorite and fine-grained granite.  
 Journal of Contaminant Hydrology (accepted)
- 14-56 Birgersson L, Gale J, Winberg A, 1995  
 TRUE – Resin injection programme – Test plan for the pilot experiment.  
 SKB Progress Report PR HRL-96-02, Stockholm
- 14-57 Olsson O, 1997  
 Planning report for 1998.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-26, Stockholm
- 14-58 Winberg A, 1997  
 Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE). Test plan for the TRUE Block Scale experiment.  
 SKB International Cooperation Report ICR 97-02, Stockholm
- 14-59 Jansson M, Eriksen T E, 1996  
 Programme for Chemlab experiments.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-01, Stockholm
- 14-60 Wikberg P, Banwart S, 1994  
 Proceedings of The Äspö International Geochemistry Workshop, June 2–3.  
 SKB International Cooperation Report ICR 94-13, Stockholm
- 14-61 Laaksoharju M, Wallin B, 1997  
 Evolution of the groundwater chemistry at the Äspö Hard Rock Laboratory.  
 Proceedings of the second Äspö International Geochemistry Workshop, June 6–7.  
 SKB International Cooperation Report ICR 97-04, Stockholm
- 14-62 Wikberg P, 1997  
 Proceedings from Workshop on hydrochemical stability and origin and evolution of deep saline groundwaters. Held i Malå, Sweden, 17–18 March.  
 SKB Progress Report PR HRL-97-25, Stockholm
- 14-63 Wikramaratna R S, Goodfield M, Rodwell W R, Nash P J, Agg P J, 1993  
 A preliminary assessment of gas migration from the Copper/Steel Canister.  
 SKB Technical Report TR 93-31, Stockholm
- 14-64 Pusch R, 1995  
 Consequences of using crushed crystalline rock as ballast in KBS-3 tunnels instead of rounded quartz particles.  
 SKB Technical Report TR 95-14, Stockholm

- 14-65 Moreno L, 1995  
Repository tunnel filled with gravel – Impact on nuclide transport.  
SKB Arbetsrapport AR 95-34, Stockholm
- 14-66 Börgesson L, 1997  
Test plan for backfill and plug test.  
SKB Progress Report PR HRL-98-08, Stockholm
- 14-67 Fairhurst C, Gera F, Gnirk P, Gray M, Stillborg B, 1993  
OECD/NEA International Stripa Project 1980–1992. Overview report, Volumes I-III.  
SKB, Stockholm
- 14-68 Kalbantner P, Sjöblom R, 1998  
Friläggningstekniker – Slutrapport.  
SKB Progress Report (under tryckning)
- 14-69 Sandstedt H, Munier R, 1998  
Projekt JADE – Jämförelse av teknik.  
SKB Progress Report (under utarbetande)
- 14-70 Pusch R, 1995  
Selection of buffer materials with special respect to their performance in a long-term perspective.  
SKB Arbetsrapport AR 95-21, Stockholm
- 14-71 Karnland O, 1996  
Test plan for long term tests of buffer material.  
SKB Progress Report PR HRL-96-22
- 14-72 Pusch R, 1994  
Gas transport through smectite clay and crystalline rock.  
SKB Arbetsrapport AR 94-61, Stockholm
- 14-73 Werme L, Sellin P, Kjellbert N, 1992  
Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects.  
SKB Technical Report TR 92-26, Stockholm

## ***Kapitel 15***

- 15-1 Smellie J A T, Karlsson F, Alexander W R, 1997  
Natural analogue studies: Present status and performance assessment implications.  
Journal of Contaminant Hydrogeology, Vol 26, pp 3-17
- 15-2 Bruno J, Duro L, Jordana S, Cera E, 1996  
Revisiting Poços de Caldas. Application of the co-precipitation approach to establish realistic solubility limits for performance assessment.  
SKB Technical Report TR 96-04, Stockholm

- 15-3 Romero L, 1995  
The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste.  
Doctoral thesis, Dept of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology,  
TRITA KET R21, Stockholm
- 15-4 Romero L, Moreno L, Neretnieks I, 1995  
Movement of a redox front around a repository for high-level nuclear waste.  
Nuclear technology, Vol 110, pp 238–249
- 15-5 Smellie J, Karlsson F, 1996  
A reappraisal of some Cigar Lake issues of importance to performance assess-  
ment.  
SKB Technical Report TR 96-08, Stockholm
- 15-6 Alexander W R, Smellie J A T, Crossland I, 1996  
Potential effects of hyperalkaline leachates on cementitious repository host rocks:  
An example from Maqarin, Northern Jordan.  
In Proceedings from Chemical containment of wastes in the geosphere, BGS,  
Nottingham, September 3–4
- 15-7 Naudet R, 1991  
Oklo: Des réacteurs nucléaires fossiles. Études physique.  
Collection du CEA, Eyrolles, Paris
- 15-8 Oversby V O, 1996  
Oklo: Des réacteurs nucléaires fossiles (Oklo: The fossil nuclear reactors). Physics  
study (R Naudet, CEA) – Translation of chapters 6, 13 and conclusions.  
SKB Technical Report TR 96-14, Stockholm
- 15-9 Behrenz P, Hannerz K, 1978  
Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline rock  
SKB Technical Report KBS 108, Stockholm
- 15-10 Oversby V O, 1996  
Criticality in a high level waste repository. A review of some important factors  
and an assessment of the lessons that can be learned from the Oklo reactors.  
SKB Technical Report TR 96-07, Stockholm
- 15-11 Blomqvist R (ed), 1997  
The Palmottu Natural Analogue Project. Hydrogeological evaluation of the  
Palmottu natural analogue site.  
European Commission, Nuclear Science and Technology (submitted)

## **Kapitel 16**

- 16-1 Holmgren K, Karlén W, 1998  
Late Quaternary changes in climate.  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (in print)

- 16-2 Ahlbom K, Äikäs T, Ericsson L O, 1991  
SKB/TVO ice age scenario.  
SKB Technical Report TR 91-32, Stockholm
- 16-3 Boulton, G S, 1991  
Proposed approach to time-dependent or “event-scenario” modelling of future glaciation in Sweden.  
SKB Arbetsrapport AR 91-27, Stockholm
- 16-4 King-Clayton L, Chapman N, Ericsson L O & Kautsky F (eds), 1997  
Glaciation and Hydrology. Workshop on the Impact of Climate Change & Glaciations on Rock Stresses, Groundwater Flow and Hydrochemistry – Past, Present and Future.  
SKI Report 97:13, Stockholm
- 16-5 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.  
Åspö Hard Rock Laboratory Progress Report 25-95-11, Stockholm
- 16-6 Boulton G S, Payne A, 1993  
Simulation of the European ice sheet through the last glacial cycle and prediction of future glaciation.  
SKB Technical Report TR 93-14, Stockholm
- 16-7 Boulton G S, Caban P, Punkari M, 1995  
Sub-surface conditions in Sweden produced by climate change, including glaciation. Project 2: Sensitivity tests and model testing.  
SKB Arbetsrapport AR 95-42, Stockholm
- 16-8 Boulton G S, Caban P, Hulton N, 1998  
Sub-surface conditions produced by long-term climate changes, including glaciation. Project 3: Further developments in modelling.  
(Manuscript)
- 16-9 Boulton G S, Zatsepin S, Maillot B, 1998  
Sub-surface conditions produced by long-term future climate changes, including glaciation. Project 5: Further developments in the analysis of groundwater flow beneath ice sheets.  
(Manuscript)
- 16-10 Wallroth T, Gustafson G, 1993  
Sub-surface conditions produced by future climate changes, including glaciation. Data support for modelling.  
SKB Arbetsrapport AR 92-77, Stockholm
- 16-11 Laaksoharju M, Smellie, J, Skårman C, 1993  
Groundwater salinity and density predictions along the Stripa-Åspö transect path.  
SKB Arbetsrapport AR 93-37, Stockholm



- 16-12 Stanfors R, Erlström M, 1995  
SKB Palaeohydrogeological Programme. Extended geological models of the Äspö area.  
SKB Arbetsrapport AR 95-20, Stockholm
- 16-13 Svensson U, 1996  
SKB Palaeohydrogeological Programme. Regional groundwater flow due to an advancing and retreating glacier – scoping calculations.  
SKB Utveckling Progress Report U-96-35, Stockholm
- 16-14 Svensson U, 1996  
SKB Palaeohydrogeological Programme. Simulations of regional groundwater flows, as forced by glaciation cycles.  
SKB Utveckling Progress Report U-96-36, Stockholm
- 16-15 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 Utveckling Progress Report U-96-19, Stockholm
- 16-16 Boulton G S, Wallroth T, Morén L, 1998  
Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel.  
SKB Technical Report TR 98- , Stockholm (in print)
- 16-17 Lindblom U, 1997  
Hydromechanical instability of a crystalline rock mass below a glaciation front.  
SKB Utveckling Project Report U-97-13, Stockholm

## ***Kapitel 17***

- 17-1 Andersson O, 1994  
Deep drilling KLX 02. Drilling and documentation of a 1700 m deep borehole at Laxemar, Sweden  
SKB Technical Report TR 94-19, Stockholm
- 17-2 Ekman L, Ludvigsson J-E, 1998  
Project Deep Drilling KLX 02 – Phase 2 Lilla Laxemar, Oskarshamn.  
Scope of Activities and Results  
SKB Technical Report TR 98-, Stockholm (in press)
- 17-3 Laaksoharju M, Smellie J, Nilsson A-C, Skårman C, 1995  
Groundwater sampling and chemical characterisation of the Laxemar deep borehole KLX 02.  
SKB Technical Report TR 95-05, Stockholm

## **Kapitel 18**

- 18-1 Hedin A, 1997  
Använt kärnbränsle – Hur farligt är det?  
SKB rapport R-97-02, Stockholm
- 18-2 Ahlström P-E, 1997  
Plutonium – data, egenskaper m m.  
SKB rapport R-97-10, Stockholm
- 18-3 Wallroth Th, 1997  
Vad betyder en istid för djupförvaret?  
SKB rapport R-97-11, Stockholm
- 18-4 Sellin P, 1997  
Använt kärnbränsle – Barriärernas säkerhetsmässiga betydelse.  
SKB rapport R-97-20, Stockholm
- 18-5 Morén L, 1997  
Använt kärnbränsle – Djupförvarets funktion och utveckling.  
SKB rapport R-97-21, Stockholm
- 18-6 Pettersson L, Ringi M, 1997  
Använt kärnbränsle – Transporter.  
SKB rapport R-97-22, Stockholm
- 18-7 Jones C, 1997  
Farliga ämnen i människans omgivning.  
SKB rapport R-97-23, Stockholm