

**R-04-41**

# **Planeringsrapport för säkerhetsanalysen SR-Can**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Juni 2003

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co  
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

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

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



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-04-41

# **Planeringsrapport för säkerhetsanalysen SR-Can**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Juni 2003

# Förord

Detta dokument är en översättning av SKB TR-03-08 "Planning Report for the Safety Assessment SR-Can". Översättningen har genomförts av Tecnita AB och granskats av SKB. Om innehållet i originalet och översättningen inte överensstämmer fullständigt gäller det engelska originalets text.

Detta dokument ger en översikt över metodiken för SKB:s nästa analys av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-djupförvar. Analysen, SR-Can<sup>1</sup>, ska vara färdigställd till slutet av 2005 och kommer att användas för SKB:s ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle. Förutom att ge en översikt över metodiken diskuterar rapporten hanteringen i SR-Can av många viktiga frågor kring närzonen, geosfären, biosfären, klimatutvecklingen etc. Rapporten har tidigare, t ex i SKB:s FUD-program 2001, benämnts Metodrapporten. Eftersom dess syfte med tiden har vidgats, så att den förutom att ge en översikt över metodiken, även fungerar som ett planeringsverktyg, kallas den nu en planeringsrapport för SR-Can.

Även om ambitionen har varit att diskutera de mest relevanta frågorna för en bedömning av den långsiktiga säkerheten, är föreslagen metodik och behandling av specifika frågor varken slutgiltig eller fullständig. Metoderna och listan över frågor kommer att utvecklas efter hand som projektet framskrider. Vidare varierar detaljeringsnivån i rapporten, ofta som en avspiegning av varierande mognadsgrad hos pågående planering snarare än som indikering av de olika frågornas relativa vikt.

Undertecknad har varit ansvarig för planeringsprojektet, metodikutvecklingen som beskrivs i kapitel 2 och för redigering av rapporten. Kristina Skagius, Kemakta Konsult AB har haft huvudansvaret för utveckling av databasen som diskuteras i avsnitt 2.5, i samarbete med Johan Andersson, JA Streamflow AB och undertecknad. Johan Andersson har gett information för hantering av initialtillstånd och för hantering av osäkerhet i indata. Både KS och JA har gett värdefulla kommentarer på den övergripande metodiken. Fred Karlsson har bidragit till diskussionen om naturanalogier i avsnitt 2.12.4.

Följande personer har bidragit till kapitlen 3 till 8: Kastriot Spahiu (bränsle); Lars Werme och Håkan Rydén (kapsel); Patrik Sellin (buffert och återfyllning och delvis bränsle); Jan-Olof Selroos (geosfärflöde och -transport); Harald Hökmark, Clay Technology AB (geomekaniska frågor); Ignasi Puigdomenech (geokemi); Lena Morén (klimat- och intrångsfrågor); Ulrik Kautsky (biosfär) och Fredrik Vahlund (integrerad radionuklid-transportmodellering). Tack även till Ola Karnland och Lennart Börgesson, Clay Technology AB, för anmärkningar med avseende på buffert- och återfyllningsfrågor.

Stockholm, juni 2003

Allan Hedin

---

<sup>1</sup> Namnet SR-Can anspelar på engelskans "canister" (kapsel) eftersom analysen ligger till grund för ansökan om inkapslingsanläggningen. "SR" står för säkerhetsrapport.

# Sammanfattning

Detta dokument är en planeringsrapport för SKB:s nästa analys av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-förvar. Analysen, SR-Can, ska vara färdigställd till slutet av 2005 och kommer att användas för SKB:s ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle. Förutom att ge en översikt över metodiken diskuterar rapporten hanteringen i SR-Can av många viktiga frågor kring närzonen, geosfären, biosfären, klimatutvecklingen etc.

Svenska kärnsäkerhets- och strålskyddsmyndigheter har nyligen utfärdat föreskrifter med avseende på slutförvaring av kärnavfall. Det grundläggande acceptanskriteriet anger att den årliga risken för skadeverkningar inte får överskrida  $10^{-6}$  för en representativ individ i gruppen som exponeras för den största risken. Det finns även ett antal krav på metoden för säkerhetsanalysen, liksom på innehållet i en säkerhetsredovisning. Föreskrifterna återges i en bilaga till denna rapport. I bilagan finns inlagda referenser till de ställen i rapporten där den avsedda hanteringen av föreskriftfrågorna i SR-Can beskrivs.

## Metodik för SR-Can

Förvarssystemet, brett definierat som det deponerade använda kärnbränslet, ingenjörbarriärerna kring det, förvarsberget och biosfären i anslutning till djupförvaret, kommer att utvecklas över tiden. Framtida tillstånd hos systemet kommer att bero på

- initialtillståndet hos systemet, t ex vid tiden för deponering,
- ett antal termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som verkar inom förvarssystemet över tiden,
- extern påverkan på systemet.

Den primära säkerhetsfunktionen hos KBS-3 är att fullständigt isolera använt kärnbränsle i kopparkapslar under hela analysperioden, vilken uppgår till en miljon år i SR-Can. Om en kapsel skulle skadas är den sekundära säkerhetsfunktionen att fördröja eventuella utsläpp från kapslarna. De båda frågorna isolering och fördröjning står därför i fokus för analysen.

Säkerhetsanalysen SR-Can kommer att bestå av ett antal huvudsteg. Dessa ska genomföras delvis i följd, delvis parallellt. Huvudstegen i analysen är följande:

### 1. Kvalitativ systembeskrivning, FEP-hantering

Detta steg består av att definiera en systemavgränsning och att beskriva systemet inom denna avgränsning, i ett format som lämpar sig för säkerhetsanalysen. KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta förhållanden, händelser och processer som påverkar den långsiktiga säkerheten struktureras och används som en utgångspunkt för analysen.

### 2. Beskrivningar av initialtillstånd

Möjliga initialtillstånd för systemet beskrivs, inklusive osäkerheter och öppna designfrågor. En platsspecifik beskrivning av geosfären och biosfären utgör en viktig del av detta steg.

### 3. Processbeskrivningar

I detta steg beskrivs i detalj alla identifierade processer inom systemavgränsningen, som påverkar den långsiktiga utvecklingen av systemet. En del av processförståelsen ges av platsbeskrivningen.

### 4. Beskrivning av randvillkor

Detta steg utgör en bred beskrivning av utvecklingen av systemets avgränsningar och fokuserar i huvudsak på i) klimatutvecklingen och dess inverkan på förvarssystemet och ii) framtida mänskliga ingrepp. Platsbeskrivningen beaktar den historiska utvecklingen som utgör nyckelinformation för den framtida utvecklingen av systemet och dess ränder.

### 5. Preliminära analyser

I detta steg utförs många analyser med målet att förstå huvudlinjerna för systemutvecklingen för flera kombinationer av initial- och randvillkor. Analyserna är oftast av förenklad typ. Känslighetsanalyser utförs för att fastställa vilka indata för analys som är viktiga för säkerheten, så att dessa data kan fastställas med särskild noggrannhet. Ett annat viktigt mål är att informera om valet av scenarier i det efterföljande steget. Här fokuserar man både på systemets isolerings- och fördröjningspotential.

### 6. Scenarioval

I detta steg väljs ett antal scenarier för detaljerad analys, utgående från information från tidigare steg i analysen och andra relevanta källor.

### 7. Val av indata

I denna deluppgift väljs data som ska användas i kvantifieringen av djupförvarets utveckling och i dosberäkningar. Resultatet beskrivs i en särskild datarapport.

### 8. Analys av scenarier

Systemets utveckling i tiden analyseras för varje scenario i detta steg. Djupförvarets isolerings- och fördröjningspotential analyseras. Probabilistiska hydro-, transport- och dosberäkningar utgör analysens kärna.

### 9. Integrering av resultat och slutsatser

Detta steg innefattar integration av resultat från olika scenarioanalyser, slutsatser med avseende på säkerhet i relation till acceptanskriterier och återkoppling med avseende på konstruktion, fortsatta platsundersökningar och FoU-program.

Initialtillståndet, de inre processerna och extern påverkan, samt de sätt på vilka de tillsammans bestämmer djupförvarets utveckling, kan aldrig till fullo fastställas, förstås eller beskrivas. Det finns därför osäkerheter av olika slag associerade till alla aspekter på djupförvarets utveckling och därmed till säkerhetsbedömningen. Ett centralt begrepp i varje säkerhetsanalysmetodik måste därför vara hantering av alla relevanta typer av osäkerhet. Denna hantering består av klassificering och beskrivning av osäkerheter, liksom av konsistent hantering av dessa vid kvantifiering av djupförvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som de medför. En preliminär plan ges för hantering av osäkerheter i de olika stegen av SR-Can.

En annan fråga som genomsyrar mycket av analysen är hanteringen av riskberäkningarna, eftersom det primära acceptanskriteriet är riskbaserat. Ett sådant angreppssätt beskrivs översiktligt, och frågor som överskattning av risk, tidsberoenden och riskspädning diskuteras.

## Klimatfrågor

Den framtida klimatutvecklingen är en avgörande del av beskrivningen av förvarssystemets externa förhållanden. Tidigare klimatförändringar, inklusive permafrost och glaciala förhållanden, kommer med största sannolikhet att uppträda även i framtiden. Tidssekvensen för dessa förändringar styrs av cykliska astronomiska fenomen som påverkar solinstrålningen. Även om framtida solinstrålning kan prognosticeras väl är det svårt att uppskatta motsvarande påverkan av klimatet, på grund av vår begränsade förståelse för klimatsystem och även på grund av tillkommande osäkra drivkrafter, som av människan orsakade växthusfenomen. Tre principiella klimattillstånd kan urskiljas:

- Det glaciala tillståndet
- Permafrosttillståndet
- Det tempererade/boreala tillståndet

Ett antal möjliga framtida klimatutvecklingar kommer att beaktas i valet av scenarier i SR-Can. Tillsammans bör dessa olika scenarier/varianter ge en god bild av möjlig utveckling.

Rapporten ger en översikt över viktiga frågor med avseende på valet av scenarier/varianter och beskrivningar av de tre klimattillstånden. Den ger även en plan för hantering av dessa i SR-Can.

## Biosfärfrågor

Biosfärkapitlet diskuterar hanteringen av biosfärens allmänna utveckling, från initialtillstånd så som beskrivs av data från platsundersökningar och framåt i olika tidsperioder. Därefter behandlas hantering av utsläppspunkter för grundvattnet, följt av en beskrivning av modellering av radionuklidomsättning, baserad på processförståelse. Numeriska modelleringsmetoder och ekosystemmodeller presenteras, liksom hantering av generiska data och hantering av exponering av människor och miljö.

## Geosfärfrågor

Mekanik: Konsekvenserna av geomekaniska processer på förvarssystemet kan sträcka sig från små förändringar av hydrauliska egenskaper hos geosfären till hot mot själva kapselns integritet. Utgående från en diskussion om initialtillståndet från mekanisk synpunkt diskuterar detta kapitel den termiska pulsen, glacial belastning, jordskalv, tidsberoende deformationer, tektoniska rörelser och inverkan av mekaniska processer på berggrundens permeabilitet.

Hydrologi och transport: Grundvattenflöde och radionuklidtransportmodellering i geosfären diskuteras i detalj för aktuella klimatförhållanden och för förändrade klimatsituationer. Modellering av transient- och densitetsdrivna flödessituationer diskuteras liksom hantering av olika skalor genom nästlad modellering, simulering av brunnar och ytnära hydrologi. Flera konceptuella aspekter på radionuklidtransport i sprickiga medier behandlas. Radionuklidtransport i deponeringstunnlar och kolloidtransport beaktas särskilt.

Geokemi: Kemisk utveckling av buffert, återfyllning och berg styrs ytterst av grundvattnets sammansättning och flöde. På lång sikt är det grundvattnets kemiska egenskaper, tillsammans med egenskaperna hos buffert och kopparkapsel, som avgör hur länge buffert och kapsel kommer att fungera korrekt. Detta avsnitt behandlar i första hand hantering i SR-Can av geokemin för djupförvarssystemet vid förslutning, med tonvikt på den rumsliga

utsträckningen och sammansättningen av påverkat grundvatten, inverkan av avsänkning och up-coning, av injekteringsbetong, sprutbetong och betonglakvatten samt av organiska material. Därefter diskuteras hantering av tidsutvecklingen under de första 1 000 åren efter förslutning, särskilt utvecklingen av salthaltfördelningen kring djupförvaret och den efterföljande modelleringen av grundvattensammansättningen, i huvudsak som konsekvens av blandning av olika grundvattentyper. Slutligen diskuteras hantering av utvecklingen under den första glaciationscykeln. Eftersom detaljerad modellering i denna fas inte är realistisk är syftet att ingränsa grundvattnet mellan två extremtyper: den ”salina isfronten” och den ”icke-salina smältzonen”. Huvudkomponenterna i glacialt smältvatten kommer att utvärderas och frågan om penetrering av syrerikt vatten kommer att behandlas.

## Närzonsfrågor

Generella närzonsfrågor som behandlas berör närzonen temperatur och inverkan av jordskalv på närzonen.

Beträffande bränsle ges särskild uppmärksamhet åt bränsleupplösning, som kommer att behandlas i detalj i en rapport som utgör ett stödande dokument till SR-Can. Övriga frågor berör atermisk diffusion, bränslekolloidbildning, radionuklidinventeringar, radionuklidkemi, kapslingsrörens integritet samt kriticitet.

Härledning av indata vad gäller frekvens och storlekar hos initiala kapselförslutningsdefekter från testserier av kapselproduktion och kvalitetskontrollsystem diskuteras i detalj. Bland övriga kapselfrågor kan nämnas fortsatt utveckling av defekta förslutningar, intern utveckling av en skadad kapsel, isostatisk kollapsbelastning av kapselinsatsen och kapselkorrosion.

Beträffande buffert och återfyllning presenteras ett antal olika material och återfyllningskoncept som ska analyseras i SR-Can. Planer för modellering av den inledande termohydromekaniska omättade fasen och långsiktig kemisk utveckling av mättad buffert och återfyllning behandlas översiktligt. Övriga frågor som behandlas är radionuklidtransportegenskaper, kolloidbildning/-erosion, gasfrågor och kapselsjunkning.

## Intrångsfrågor

Hanteringen av framtida mänskliga ingrepp, i synnerhet intrång i förvar, begränsas i SR-Can till ingrepp som utförs efter förslutning av djupförvaret, som sker vid eller nära förvaret, som är oavsiktliga och som negativt påverkar prestanda hos förvarets barriärer. Metodiken för hantering av intrångsfrågor liknar den som tillämpas i SKB:s tidigare säkerhetsanalys SR 97.

## Integrerad modellering

Tillgängliga verktyg för integrerad modellering presenteras. En ny och förenklad modell för integrerad simulering av djupförvarssystemets utveckling är tillgänglig. Modellen är uppbyggd av flera separata modeller som användes i SR 97 för t ex den termiska utvecklingen av alla förvarskomponenter, för buffert- och återfyllningsreologi, för långsiktig kemisk utveckling av buffert, för kopparkorrosion och för den inre utvecklingen av en skadad kapsel.

Då det gäller radionuklidtransport och dosberäkningar finns nu förenklade och snabba analytiska modeller och de numeriska verktygen som används i SR 97 har utvecklats ytterligare, särskilt med avseende på numeriska plattformar och representationer av biosfären.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	13
1.1	SKB:s program för använt kärnbränsle	13
1.1.1	Rapportering av den långsiktiga säkerheten under aktuellt programsteg	14
1.2	Syfte med säkerhetsanalysen SR-Can	14
1.3	Syfte med denna rapport	14
1.4	Föreskrifter	15
1.4.1	Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SSI FS 1998:1	15
1.4.2	Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SKIFS 2002:1	16
<b>2</b>	<b>Metodik</b>	17
2.1	Inledning	17
2.1.1	Struktur för säkerhetsredovisning	20
2.2	Hantering av platsinformation	20
2.3	Tidsskala för analysen	21
2.3.1	Föreskrifternas krav och riktlinjer	21
2.3.2	Konsekvenser för SR-Can	21
2.4	Format för systembeskrivning	22
2.5	FEP-databas	25
2.6	Initialtillstånd	25
2.6.1	Krav och faktorer att beakta	26
2.6.2	Resultat av FEP-analys	27
2.6.3	Information från platsbeskrivningen	27
2.6.4	Utveckling av bergsförhållanden under förvarsdrift	28
2.6.5	Missöden	29
2.6.6	Val av initialtillstånd	30
2.7	Processbeskrivningar	30
2.7.1	Struktur för processbeskrivningar	30
2.8	Hantering av föränderliga externa förhållanden och yttre händelser	36
2.9	Preliminära analyser	37
2.9.1	Syften	37
2.9.2	Metoder för preliminära analyser	37
2.9.3	Frågor att behandla	38
2.9.4	Exempel på probabilistiska transport- och dosberäkningar	39
2.9.5	Känslighetsanalyser	41
2.9.6	Exempel på förväntade resultat	44
2.9.7	Tidsskala för förvarsutveckling	44
2.10	Scenarioval	44
2.10.1	Föreskrifter och allmänna råd	45
2.10.2	Tillämpning i SR-Can	46
2.11	Kompilering av indata	47
2.11.1	Datainventarium	47
2.11.2	Procedur för tilldelning av värden	48
2.11.3	Fokusering av resurser	48
2.12	Analys av scenarier	49
2.12.1	Gränssättande beräkningsfall	49



2.12.2	Känslighetsanalyser	50
2.12.3	Alternativa säkerhetsindikatorer	50
2.12.4	Användning av naturliga analogier	52
2.13	Integrering av resultat och slutsatser	53
2.13.1	Allmän diskussion och risksummering	53
2.13.2	Återkoppling till platsundersökningar	53
2.13.3	Återkoppling till förvarsutformning	54
2.13.4	Återkoppling till Forskning och utveckling	54
2.13.5	Återkoppling till framtida säkerhetsanalyser	54
2.14	Övergripande hantering av information/osäkerhet samt kvalitetssäkringsplan	55
2.14.1	Klassificering av osäkerheter	55
2.14.2	Behov av stiliserade exempel	56
2.14.3	Plan för osäkerhetshantering	57
2.14.4	Sammanfattning	60
2.15	Metod för riskberäkningar	60
2.15.1	Föreskrifternas krav och riktlinjer	60
2.15.2	Tillämpning i SR-Can	61
2.15.3	Överskattning av risk	61
2.15.4	Tidsberoende risk eller maxvärde över hela analysperioden?	62
2.15.5	Riskspädning	62
2.15.6	Frågor som måste klargöras	64
<b>3</b>	<b>Klimatfrågor</b>	65
3.1	Inledning	65
3.1.1	Strategi för hantering av olika klimatförhållanden i SR-Can	65
3.2	Val av möjlig framtida klimatutveckling	66
3.3	Tempererat/borealt tillstånd	67
3.4	Permafrosttillstånd	68
3.5	Glacialt tillstånd	68
<b>4</b>	<b>Biosfärfrågor</b>	71
4.1	Inledning	71
4.2	Generell biosfärutveckling	71
4.2.1	Aktuell status	71
4.2.2	De första 1 000 åren	73
4.2.3	Perioden fram till nästa nedisning	75
4.2.4	Istiden	75
4.2.5	Nästa interglaciala period	75
4.3	Utsläppspunkter	75
4.3.1	Hydrologi	75
4.3.2	Brunnar	76
4.4	Processer och FEP	76
4.5	Modellering av radionuklidtransport, doser till människor och koncentrationer i biota	77
4.5.1	Rumslig modellering	77
4.5.2	Verktyg	78
4.5.3	Akvatiska modeller	78
4.5.4	Terrestra modeller	78
4.6	Allmänna data	79
4.6.1	Radionukliddata	79
4.6.2	Människor	79
4.7	Sannolikhetsuppskattningar för riskberäkningar	79

<b>5</b>	<b>Geosfärfrågor</b>	81
5.1	Mekanikfrågor	81
5.1.1	Inledning	81
5.1.2	Initialtillstånd	81
5.1.3	Termisk puls	82
5.1.4	Glacial belastning	83
5.1.5	Jordskalv	84
5.1.6	Tidsberoende deformationer	85
5.1.7	Tektoniska rörelser	86
5.1.8	Inverkan av mekaniska processer på berggrundens permeabilitet	86
5.1.9	Generella frågor	86
5.2	Flödesmodellering för aktuella klimatförhållanden	88
5.3	Transportmodellering för aktuella klimatförhållanden	91
5.3.1	Strategi för modellering av radionuklidtransport i deponeringstunnlar	95
5.3.2	Kolloidtransport	96
5.4	Modellering av grundvattenflöde och radionuklidtransport för klimatscenarier	97
5.4.1	Tempererat (interglacialt) tillstånd	97
5.4.2	Permafrosttillståndet	97
5.4.3	Det glaciala tillståndet	98
5.4.4	Koppling mellan olika klimattillstånd	98
5.4.5	Koppling mellan grundvattenflöde/transport och relaterade ämnesområden	99
5.4.6	Sammanfattning	99
5.5	Geokemi	100
5.5.1	Inledning	100
5.5.2	Geokemi för förvarssystemet vid förslutning	100
5.5.3	Initial tidsutveckling av grundvatten (0 till ~1 000 år)	101
5.5.4	Ytterligare tidsutveckling av grundvatten under den första glaciationscykeln (~1 000 till ~120 000 år)	102
<b>6</b>	<b>Närzonsfrågor</b>	105
6.1	Närzonstemperatur	105
6.2	Inverkan av jordskalv på närzonen	106
6.3	Bränslefrågor	107
6.3.1	Bränsleupplösning	107
6.3.2	Atermisk diffusion	108
6.3.3	Kolloidbildning	109
6.3.4	Radionuklidinventarier för SR-Can	109
6.3.5	Radionuklidkemi i SR-Can	110
6.3.6	Kapslingsrörintegritet	110
6.3.7	Kriticitet	111
6.4	Kapselrörfrågor	111
6.4.1	Initiala kapseldefekter	112
6.4.2	Den vidare utvecklingen av defekta förslutningar	114
6.4.3	Intern utveckling av skadad kapsel	114
6.4.4	Isostatisk kollapsbelastning	115
6.4.5	Korrosion	115
6.5	Buffert- och återfyllningsfrågor	116
6.5.1	Inledning	116
6.5.2	Val av buffert och återfyllningsmaterial som ska analyseras	117

6.5.3	Tillgängliga och tillkommande data om fysiska materialegenskaper	117
6.5.4	Initial termohydromekanisk modellering av buffert och återfyllning	118
6.5.5	Långsiktig modellering av kemisk utveckling av buffert och återfyllning	119
6.5.6	Radionuklidtransportegenskaper	119
6.5.7	Kolloidbildning/-erosion från buffert/återfyllning för grundvatten med låg jonstyrka	120
6.5.8	Gasfrågor	120
6.5.9	Kapselsjunkning	120
<b>7</b>	<b>Intrångsfrågor</b>	123
7.1	Föreskrifter och råd	123
7.2	Behandling i SR-Can	123
7.2.1	Metod	124
7.2.2	Plan	125
<b>8</b>	<b>Integrerad modellering</b>	127
8.1	Systemutveckling	127
8.2	Radionuklidtransport- och dosberäkningar	129
8.2.1	Plattformer för radionuklidtransportberäkningar	130
8.2.2	Närzonsmodellen	131
8.2.3	Fjärrzonsmodellen	132
8.2.4	Biosfärmodellen	132
<b>9</b>	<b>Referenser</b>	135
Bilaga A	Tillämpliga föreskrifter och SKBs implementering av dessa i säkerhetsvärderingen SR-Can	143

# 1 Inledning

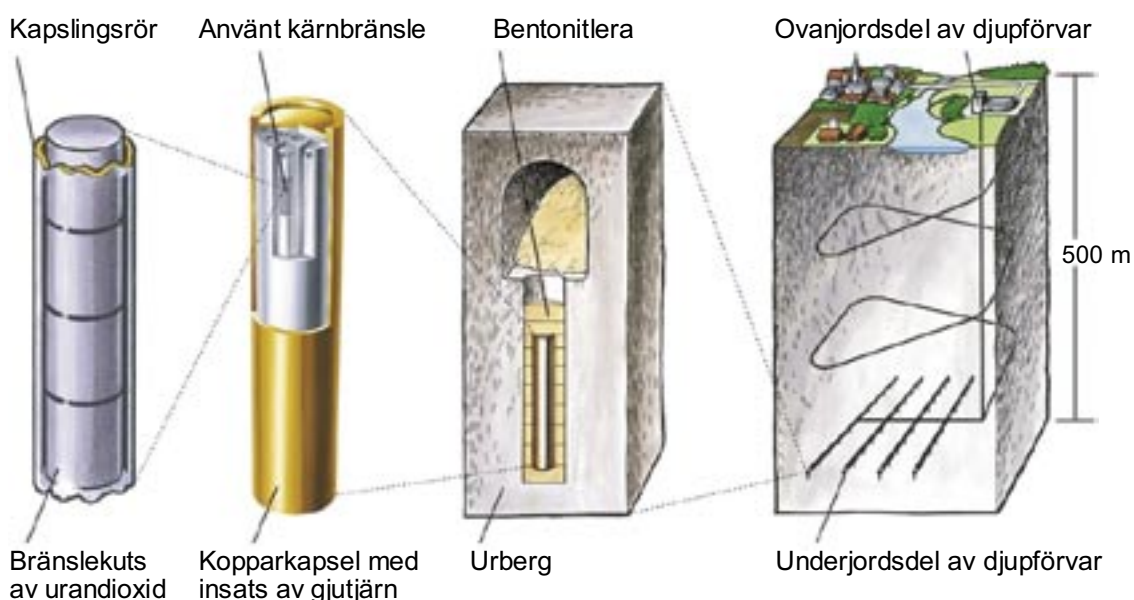
## 1.1 SKB:s program för använt kärnbränsle

Kärnavfall i Sverige hanteras av Svensk kärnbränslehantering AB, SKB. Inom SKB:s program för använt kärnbränsle drivs idag (juni 2003) ett centralt mellanlager och ett transportsystem. Baserat på flera decenniers forskning och utveckling har SKB fört fram KBS-3 som den föredragna metoden för det slutliga steget i hanteringen av använt kärnbränsle. Enligt denna metod placeras använt kärnbränsle i kopparkapslar med en gjutjärnsinsats. Kapslarna deponeras på cirka 500 m djup i mättat granitiskt berg och omges av bentonitlera, se figur 1-1.

Två huvudsakliga återstående uppgifter i programmet är att lokalisera, bygga och driva i) djupförvaret och ii) en inkapslingsanläggning där det använda kärnbränslet placeras i kapslar som ska deponeras i djupförvar.

SKB genomför för närvarande platsundersökningar för ett djupförvar i kommunerna Östhammar och Oskarshamn. Undersökningarna utförs i två steg. En inledande fas följs, om platsen uppfyller förväntningarna, av en fullständig platsundersökningsfas. Målet är att bygga ett djupförvar vid en av dessa kandidatplatser, förutsatt att urberget och andra relevanta förhållanden befins lämpliga. En ansökan om att bygga ett djupförvar kommer enligt aktuella tidplaner att inges i slutet av 2008.

Huvudalternativet för lokalisering av inkapslingsanläggningen är i Oskarshamn, i anslutning till den befintliga mellanlagret. En ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning kommer att inges 2006.



*Figur 1-1. KBS-3-konceptet för djupförvaring av använt kärnbränsle.*

### **1.1.1 Rapportering av den långsiktiga säkerheten under aktuellt programsteg**

De två ansökningar som förutses i aktuellt steg av SKB:s program för använt kärnbränsle fordrar var sin rapport om den långsiktiga säkerheten för djupförvaret. Detta är ett uppenbart krav för ansökan om att bygga djupförvaret. Även ansökan om att bygga inkapslingsanläggningen kommer att kräva en sådan rapport eftersom det i den ansökan måste visas att ett djupförvar med de förslutna kapslar som ska levereras från inkapslingsanläggning uppfyller de krav på långsiktig säkerhet som ställts upp av svenska myndigheter.

Två säkerhetsrapporter kommer därför att tas fram inom de närmaste fem åren; en för ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning och en för ansökan om att bygga djupförvaret. Dessa rapporter benämns fortsättningsvis SR-Can respektive SR-Site. SR-Can ska baseras på platsdata från den inledande platsundersökningsfasen och SR-Site på data från den fullständiga platsundersökningen.

Efter en inledande fas av SR-Can-projektet kommer en interimrapport att tas fram, med huvudsyftet att demonstrera den valda metodiken, så att denna kan granskas innan den används för ansökningarna. Det är t ex önskvärt att visa att större delen av gransknings-synpunkter på metodfrågor i SKB:s tidigare säkerhetsanalys, SR 97 /SKB, 1999a/, har behandlats adekvat. Denna interimrapport kommer preliminärt att publiceras i augusti 2004, men en detaljerad plan för omfattningen av rapporten, och för när inom SR-Can-projektet den bör publiceras, återstår att fastställa i samråd med relevanta myndigheter.

Dessutom kommer preliminära säkerhetsbedömningar /SKB, 2002/ för varje plats att genomföras som deluppgifter inom SR-Can-projektet. Huvudsyftena med dessa bedömningar är att fastställa om tidigare bedömningar av lämpligheten hos kandidatområdet för ett djupförvar, med avseende på den långsiktiga säkerheten, kvarstår i ljuset av borrhålsdata. Vidare ska de ge återkoppling inför fortsatta platsundersökningar och platsspecifik djupförvarsutformning.

## **1.2 Syfte med säkerhetsanalysen SR-Can**

Så nämnts kommer SR-Can att användas för SKB:s ansökan om att bygga en inkapslingsanläggning. Syftet med säkerhetsanalysen SR-Can kommer att definieras noggrant på ett tidigt stadium i SR-Can projektet. Preliminärt kan den beskrivas som att i huvudsak ha två syften

1. SR-Can ska bedöma potentialen för ett förvar av KBS-3-typ vid kandidatplatsen att uppfylla tillämpliga myndighetskriterier i svensk lag, utgående från data från inledande platsundersökningar.
2. SR-Can ska ge återkoppling till konstruktionsutveckling, till SKB:s FoU-program, till ytterligare platsundersökningar och till framtida säkerhetsanalysprojekt.

## **1.3 Syfte med denna rapport**

Syftet med denna rapport är att utgöra underlag för planering av säkerhetsanalysen SR-Can. I och med detta ger rapporten en översikt över metodiken som ska användas i SR-Can och diskuterar många frågor relaterade till olika komponenter i djupförvarssystemet och dess omgivning.

Planerna med avseende på metodik och behandling av specifika frågor som behandlas översiktligt i rapporten är i de flesta fall relativt mogna, men kan komma att modifieras under projektets gång. Vidare har avsikten varit att behandla alla större metod- och teknikfrågor som är relevanta för SR-Can, men uppsättningen frågor är inte fullständig.

## 1.4 Föreskrifter

Formen hos och innehållet i en säkerhetsanalys, och framför allt kriterierna för bedömning av säkerheten för djupförvaret, definieras i föreskrifter utfärdade av Statens kärnkraftsinspektion, SKI, och Statens strålskyddsinstitut, SSI. Föreskrifterna utgår från övergripande lagar, varav de viktigaste är Miljöbalken, Kärntekniklagen och Strålskyddslagen. Strålskyddsfrågor hanteras inom en rad internationella organ. Internationella regler och rekommendationer ligger ofta till grund för den nationella lagstiftningen.

Med avseende på den långsiktiga säkerheten för djupförvar för kärnavfall finns två mera detaljerade föreskrifter av särskild vikt, utfärdade av SSI respektive SKI:

- ”Statens strålskyddsinstituts föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSI FS 1998:1).
- ”Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” (SKIFS 2002:1).

De båda dokumenten återges i sin helhet i en bilaga till denna rapport. Det sätt på vilket SKB avser att uppfylla kraven anges i form av referenser till relevanta avsnitt i kapitel 2, infogade i författningstexterna i bilagan.

### 1.4.1 Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SSI FS 1998:1

Dessa föreskrifter återges i avsnitt A.2.1. Delarna i SSI FS 1998:1 som är mest relevanta för bedömning för den långsiktiga säkerheten anger följande:

- Skydd av människors hälsa ska påvisas genom uppfyllande av ett riskkriterium som anger att ”den årliga risken för skadeverkningar inte får överskrida  $10^{-6}$  för en representativ individ i gruppen som exponeras för störst risk”.
- Vad beträffar miljöskydd ska de biologiska effekterna av joniserande strålning i påverkade livsmiljöer och ekosystem beskrivas, utgående från tillgänglig kunskap.
- Konsekvenserna av intrång i ett djupförvar ska rapporteras och skyddsförmågan för förvaret efter intrång ska beskrivas.
- SSI kräver en mera detaljerad bedömning för de första 1 000 åren efter förslutning av djupförvaret.

SSI har dessutom utfärdat en rapport med bakgrund och författningskommentarer till SSI FS 1998:1. Denna rapport ger ytterligare ledning med avseende på implementering av föreskrifterna. Utdrag från rapporten, relevanta för en bedömning av den långsiktiga säkerheten, ges också i bilagan.

Vidare planerar SSI att ge ut Allmänna rekommendationer med avseende på tillämpning av SSI FS 1998:1.

#### **1.4.2 Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SKIFS 2002:1**

Dessa föreskrifter återges i avsnitt A.1.1. Delarna i SSI FS 2002:1 som är mest relevanta för bedömning av den långsiktiga säkerheten anger följande:

- Säkerhetsanalyserna ska omfatta förhållanden, händelser och processer som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning.
- En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år.
- Krav på rapportering av analysmetoder
  - för systembeskrivning och utveckling,
  - för valet av scenarier (inklusive ett huvudscenario som tar hänsyn till de mest sannolika förändringarna i slutförvaret och dess omgivning),
  - tillämpbarheten för modeller, parametervärden och andra förhållanden som används i analysen,
  - hantering av osäkerheter och känslighetsanalys.
- Med avseende på analys av förhållanden efter förslutning kräver SKI beskrivning av utvecklingen i biosfären, geosfären och förvaret för valda scenarier; slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.

SKI har även utfärdat Allmänna råd med avseende på tillämpning av SKIFS 2002:1. Där finns mera detaljerade diskussioner om klassificering av scenarier och osäkerheter. Utdrag ur råden, relevanta för en bedömning för den långsiktiga säkerheten, ges också i bilagan, tillsammans med indikeringar om hur SKB avser att uppfylla kraven.

## 2 Metodik

### 2.1 Inledning

Detta kapitel ger en översikt över metodiken som ska användas för SR-Can. Det är skrivet för planeringsändamål, men kan till vissa delar betraktas som en tidig version av ett metodik-kapitel i den slutliga rapporten för SR-Can. Metodiken kommer att utvecklas ytterligare under projektet och detta kommer att återspeglas i den slutliga rapporten.

Huvudsyftena med en säkerhetsanalys för ett djupförvar är att undersöka om djupförvaret kan betraktas som radiologiskt säkert över tiden. Detta görs i princip genom att jämföra uppskattade utsläpp och doser från förvaret med myndighetskriterier.

Förvarssystemet, brett definierat som det deponerade använda kärnbränslet, de tillverkade barriärerna kring det, förvarsberget och biosfären i anslutning till djupförvaret, kommer att utvecklas över tiden. Framtida tillstånd hos systemet kommer att bero på

- initialtillståndet hos systemet, t ex vid tiden för deponering,
- ett antal termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som verkar inom förvarssystemet över tiden,
- extern påverkan på systemet.

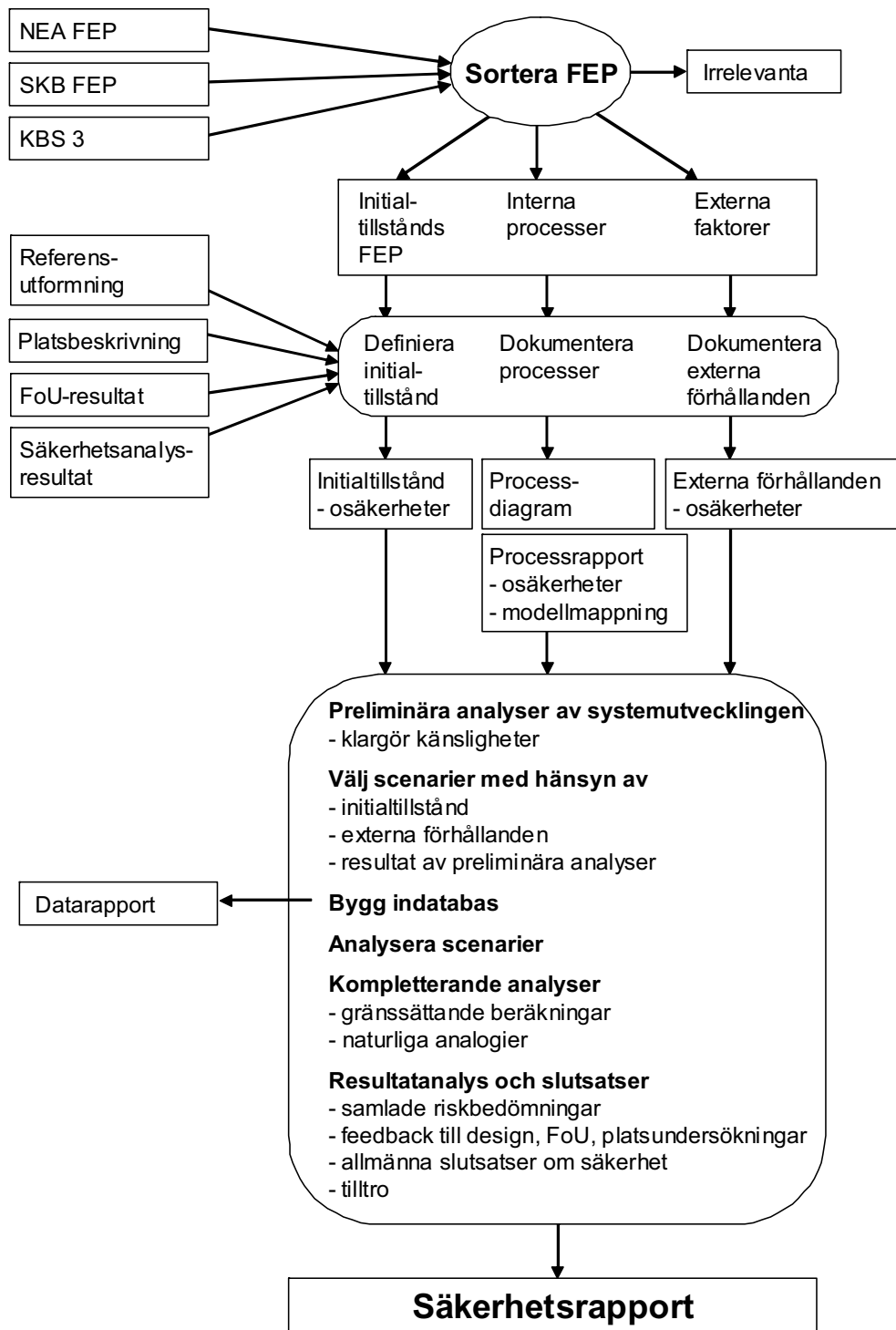
Interna processer är t ex sönderfallet av radioaktivt material, vilket medför generering av värme och därav följande uppvärmning av bränslet, de tillverkade barriärerna och berggrunden. Grundvattenrörelser och kemiska processer som påverkar tillverkade barriärer och grundvatten är andra exempel. Som extern påverkan kan nämnas inverkan av klimat och framtida klimatförändringar, landhöjning och uppbyggnad av mekaniska spänningar på grund av tektoniska rörelser. Även framtida mänskliga ingrepp kan påverka djupförvaret.

Initialtillståndet, de inre processerna och den externa påverkan, samt de sätt på vilka dessa faktorer tillsammans bestämmer djupförvarets utveckling, kan aldrig till fullo fastställas, förstås eller beskrivas. Det finns därför osäkerheter av olika slag associerade till alla aspekter på djupförvarets utveckling och därmed på säkerhetsbedömningen. Ett centralt inslag i varje säkerhetsanalysmetodik måste därför vara hantering av alla relevanta typer av osäkerhet. Denna hantering består av klassificering och beskrivning av osäkerheter, liksom av konsistent hantering av dessa vid kvantifiering av djupförvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som de medför.

Den primära säkerhetsfunktionen av KBS-3-systemet, som beskrivs i figur 1-1 är att fullständigt isolera det använda kärnbränslet i kopparkapslar över hela analysperioden, vars längd återstår att definiera. Om en kapsel skulle skadas är den sekundära säkerhetsfunktionen att fördröja eventuella utsläpp från kapslarna. De båda frågorna isolering och fördröjning står därför i fokus för analysen.

Säkerhetsanalysen SR-Can kommer att bestå av ett antal huvudsteg, som ska genomföras delvis i följd, delvis parallellt. Från projektledningens synpunkt kan många av stegen betraktas som delprojekt i ett större integrerat säkerhetsanalysprojekt. Stegen är även en lämplig struktur för mycket av presentationen av metodiken i detta kapitel, så som avspeglas i flera av de följande delavsnitten. Metodiken är en utveckling av den som använts i SR 97. Figur 2-1 ger en grafisk illustration av stegen och huvudprodukterna som de ska resultera i.





Figur 2-1. En översikt över huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Can. Aktiviteter visas som ellipser, indata och produkter som rektanglar.

Huvudstegen i analysen är följande:

1. Kvalitativ systembeskrivning, FEP-hantering

Detta steg består av att definiera en systemavgränsning och att beskriva systemet inom denna avgränsning, i ett format som lämpar sig för säkerhetsanalysen. KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta förhållanden, händelser och processer som påverkar den långsiktiga säkerheten är strukturerade och används som en utgångspunkt för analysen.

2. Beskrivningar av initialtillstånd

Möjliga initialtillstånd för systemet beskrivs, inklusive osäkerheter och öppna designfrågor. En platspecifik beskrivning av geosfären och biosfären utgör en viktig del av detta steg.

3. Processbeskrivningar

I detta steg beskrivs i detalj alla identifierade processer inom systemavgränsningen, som påverkar den långsiktiga utvecklingen av systemet. En del av processförståelsen ges av platsbeskrivningen.

4. Beskrivning av randvillkor

Detta steg utgör en bred beskrivning av utvecklingen av systemets avgränsningar och fokuserar i huvudsak på i) klimatutvecklingen och dess inverkan på förvarssystemet och ii) framtida mänskliga ingrepp. Platsbeskrivningen beaktar den historiska utvecklingen som utgör nyckelinformation för den framtida utvecklingen av systemet och dess ränder.

5. Preliminära analyser

I detta steg utförs många analyser med målet att förstå huvudlinjerna för systemutvecklingen för flera kombinationer av initial- och randvillkor. Analyserna är oftast av förenklad typ. Känslighetsanalyser utförs för att fastställa vilka indata för analys är viktiga för säkerheten så att dessa data kan fastställas med särskild noggrannhet. Ett annat viktigt mål är att informera om valet av scenarier i det efterföljande steget. Här fokuserar man både på systemets isolerings- och fördröjningspotential.

6. Scenarioval

I detta steg väljs ett antal scenarier för detaljerad analys, utgående från information från tidigare steg i analysen och andra relevanta källor.

7. Val av indata

I denna deluppgift väljs data som ska användas i kvantifieringen av djupförvarets utveckling och dosberäkningar. Resultatet rapporteras i en särskild datarapport.

8. Analys av scenarier

Systemets utveckling i tiden analyseras för varje scenario i detta steg. Djupförvarets isolerings- och fördröjningspotential analyseras. Probabilistiska hydro-, transport- och dosberäkningar utgör analysens kärna.

9. Integrering av resultat och slutsatser

Detta steg innefattar integration av resultat från olika scenarioanalyser, slutsatser med avseende på säkerhet i relation till acceptanskriterier och återkoppling med avseende på konstruktion, fortsatta platsundersökningar och FoU-program.

Dessa steg kommer att diskuteras i närmare detalj nedan, tillsammans med andra relevanta frågor med avseende på metodik.

### **2.1.1 Struktur för säkerhetsredovisning**

Strukturen hos säkerhetsredovisningen som ska utgöra slutprodukten av SR-Can-projektet kommer i princip att motsvara den för huvudstegen i metodiken. Många delar av projektet kommer att dokumenteras i specifika rapporter och sammanfattas i huvudrapporten.

Strukturen kommer i viss mån att påverkas av kraven i tillämpliga föreskrifter. Till exempel anger SKIFS 2002:1 i en bilaga ett antal krav på redovisning av analysmetoder och analys av förhållanden efter förslutning.

Vidare ska innehållet i säkerhetsredovisningen vara förenligt med internationell konsensus inom detta område, så som t ex uttrycks i /NEA, 1997a/.

## **2.2 Hantering av platsinformation**

En stor del av grunden för säkerhetsanalyserna SR-Can och SR-Site kommer att ges av SKB:s pågående platsundersökningar i kommunerna Oskarshamn och Östhammar.

Fältdata från platsundersökningarna analyseras inom platsundersökningsprojektet, av en platsanalysgrupp som tar fram en platsbeskrivande modell av geosfären och biosfären. Den platsbeskrivande modellen är en syntes av observationer av dagens tillstånd på platsen och av förståelse för tidigare och pågående fenomen, t ex hydrauliska och geokemiska processer som landhöjning och långsiktigt föränderligt klimat. Modellsimuleringar av historisk utveckling av platsen är en viktig del av syntesarbetet som utförs av platsanalysgruppen. Den resulterande geosfärmodellen i 3D av aktuella förhållanden illustrerar termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och transportrelaterade egenskaper hos berget, i en geometrisk ram som beskriver platsens huvudsakliga struktur. Biosfärdelen av modellen innehåller en beskrivning av ekosystemen på platsen. Modellen kompletteras av en noggrann beskrivning av den interdisciplinära analys och det tolkningsarbete som stöder den.

Platsbeskrivningsmodellen ger viktiga delar av beskrivningen av initialtillståndet hos geosfären (se avsnitt 2.6.3) och biosfären (avsnitt 4.2.1) för säkerhetsanalysen. Modellen beskriver emellertid situationen före byggandet av djupförvaret, medan initialtillståndet i säkerhetsanalysen hänför sig till tiden för deponering av kapslar med avfall. Analyser av hur brytningsarbeten påverkar det ostörda naturliga tillståndet hos berg är därför nödvändiga. Viktiga delar av detta arbete kommer att utföras av en projekteringsgrupp i samband med gruppens bedömning av en lämplig förvarslayout i platsmodellen.

Förutom att ge underlag för beskrivningen av initialtillståndet av geosfären och biosfären ger den platsbeskrivande modellen förståelse för tidigare och pågående processer vid platsen. Denna information kommer att vara avgörande för beskrivning och modellering av framtida utveckling, vars resultat ska vara kompatibelt med förståelsen av platshistoriken.

Säkerhetsanalysen kommer att använda hydrauliska simuleringsmodeller som sätts upp av platsanalysgruppen. Medan dessa i huvudsak används av platsanalysgruppen för att simulera platsens historik står den framtida utvecklingen i fokus för säkerhetsanalysen.

Resultaten av säkerhetsanalysen ska ge återkoppling till såväl ytterligare platsundersökningar som konstruktionsarbete. Beträffande platsmodellen kommer en samlad bedömning av tilltron till den platsbeskrivande modellen att göras inom ramen för säkerhetsanalysen. Här ligger tonvikten på aspekter som har direkt relevans för säkerheten, se vidare i avsnitt 2.13.

## **2.3 Tidsskala för analysen**

### **2.3.1 Föreskrifternas krav och riktlinjer**

SKI:s föreskrifter SKI FS 2002:1 anger att säkerhetsanalysen ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år. De allmänna råden om tillämpningen av SKI-föreskrifterna anger att tidsskalan för en analys ska sättas i relation till den fara som förvarets innehåll utgör, i jämförelse med naturligt förekommande radionuklider. I rekommendationerna understryks vidare att "...det ska även vara möjligt att beakta svårigheterna att utföra meningsfulla analyser för extremt långa tidsperioder, bortom en miljon år...".

SSI:s föreskrifter stipulerar att "För de första tusen åren efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön." "För tiden efter tusen år efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären."

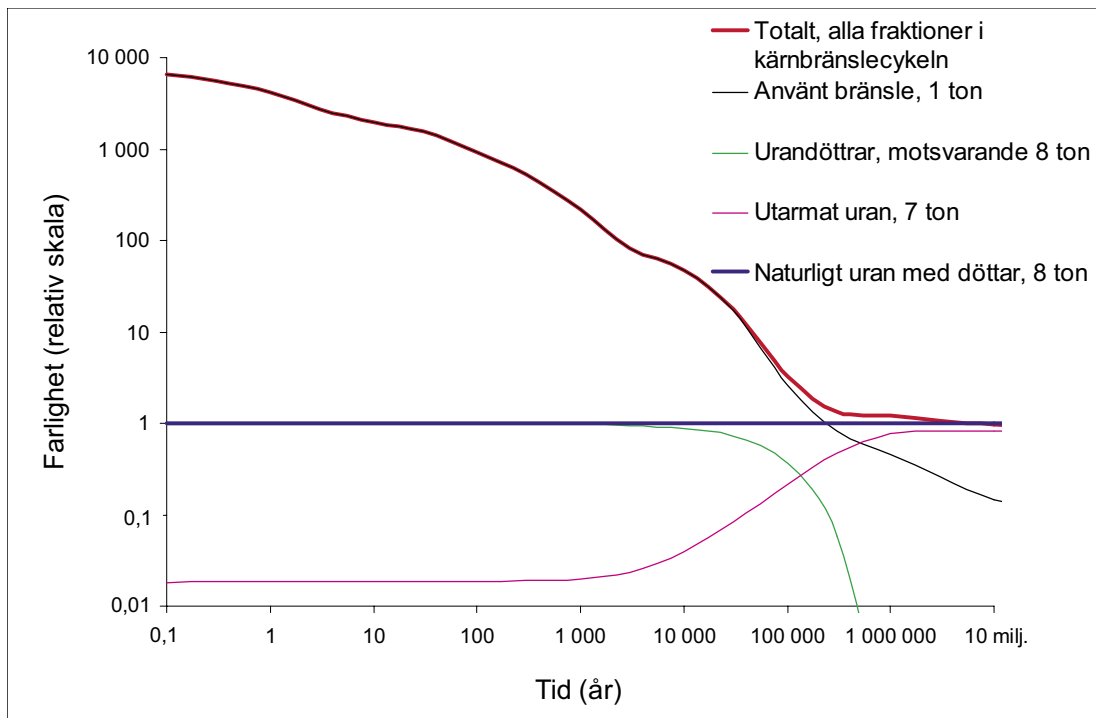
SSI:s föreskrifter skiljer alltså mellan två faser för analysen, men anger ingen borte gräns för analysperioden.

### **2.3.2 Konsekvenser för SR-Can**

I fallet använt kärnbränsle krävs en analysperiod längre än 10 000 år. Efter cirka 100 000 år är radiotoxiciteten för använt kärnbränsle jämförbar med den hos den naturliga uranmalm som använts för att producera bränslet /Hedin, 1997/. Även summan av toxiciteten hos alla fraktioner i kärnbränslecykeln är jämförbar med den hos den utnyttjade uranmalmen efter 100 000 år, se figur 2-2. Sistnämnda jämförelse är grovt sett ekvivalent med att jämföra radiotoxiciteten hos den mängd U-235 som förbrukas vid fission i reaktorn, med radiotoxiciteten hos produkterna från fissionsprocessen.

Ett annat kriterium som kan användas för att motivera en tidsskala för en säkerhetsanalys är att den analyserade perioden ska sträcka sig bortom den punkt i tiden då doserna från förvaret når sitt maximum. I SKB:s senaste säkerhetsanalys för KBS-3-systemet, SR 97, inträder dosmaximum inom en miljon år i de flesta beräkningsfall. En miljon år är också den analysperiod som tillämpades i SR 97. Emellertid finns det även exempel där dosmaximum uppträder i slutet av analysperioden, på grund av inväxt av den naturligt förekommande nukliden Ra-226. Eftersom KBS-3-konceptet är inriktat mot fullständig isolering av avfallet genom inkapsling, under en tidsperiod som sträcker sig mycket långt in i framtiden, bedöms dosmaximumkriteriet som mindre lämpligt.

I SR-Can kommer tidsskalan för analysen att vara en miljon år. Denna tidsskala är längre än vad som behövs för att minska radiotoxiciteten för förvarets innehåll till en nivå jämförbar med motsvarande mängd naturlig uranmalm och uppfyller även vad som anges i SKI:s råd som citeras ovan. Eventuellt ges även en kortfattad allmän diskussion av utvecklingen utöver en miljon år i SR-Can.



**Figur 2-2.** Radiotoxicitet vid förtäring av uranmalm (blå kurva), och av summan av alla fraktioner som uppstår när samma kvantitet uranmineral används i kärnbränslecykeln (röd kurva). De olika fraktionerna utgör det använda kärnbränslet (38 MWd/kg U SVEA 64 BWR), det utarmade uranet och urandöttrarna som separeras i uranverket. Från /Hedin, 1997/.

## 2.4 Format för systembeskrivning

Djupförvarssystemet består av det använda kärnbränslet, kapslar, bufferten, tunnelåterfyllningen, geosfären och biosfären i närheten av djupförvaret, se figur 1-1. I utvecklingen av FEP-databasen (se nedan), definierades systemets gränser i närmare detalj. Följande kan noteras från denna definition:

- Grovt sett betraktas den del av biosfären som studerats i platsundersökningarna, dvs ett område av storleksordningen 100 km<sup>2</sup> över djupförvaret, som en del av systemet, medan biosfären på större avstånd betraktas som extern.
- Grovt sett betraktas den del av geosfären som täcks av den lokala modellen (cirka 2–6 km<sup>2</sup> av ytan över det potentiella förvaret) som en del av systemet. Beroende på analys-sammanhanget kan dessa avgränsningar vidgas ytterligare.
- Framtida mänskliga handlingar i lokal skala är interna, men inte frågor hänförliga till framtidens samhälle i stort.
- En generell strikt gränsdefinition är varken möjlig eller nödvändig, och samma avgränsningar är inte med nödvändighet relevanta i alla delar av säkerhetsanalysen.

- Begränsningen för systemkomponenten återfyllning definieras i geometriska termer som alla brutna bergrum utom deponeringshålen. Definitionen innefattar alltså deponeringstunnlar, ramper och schakt, ventilationsschakt, prospekteringshål, hål för bergförstärkningar etc. Allt material inom dessa volymer ingår, t ex återfyllningen, pluggar och förstärkningar. Injekteringsmaterial tillhör geosfären eftersom det i första hand injiceras i naturligt förekommande sprickor.
- Genom denna separering av buffert och återfyllning är systembeskrivningen inte längre (som i SR 97-analysen) endimensionell i den meningen att en systemkomponent bara kan ha en inre och en yttre granne. Denna minskade enkelhet i systembeskrivningen bedömdes nödvändig för att få en adekvat behandling av återfyllningen. Återfyllningen har ingen inre avgränsning, men samverkar med både berg och buffert längs sin ”yttre” avgränsning och berget samverkar med både bufferten och återfyllningen längs sin inre avgränsning.

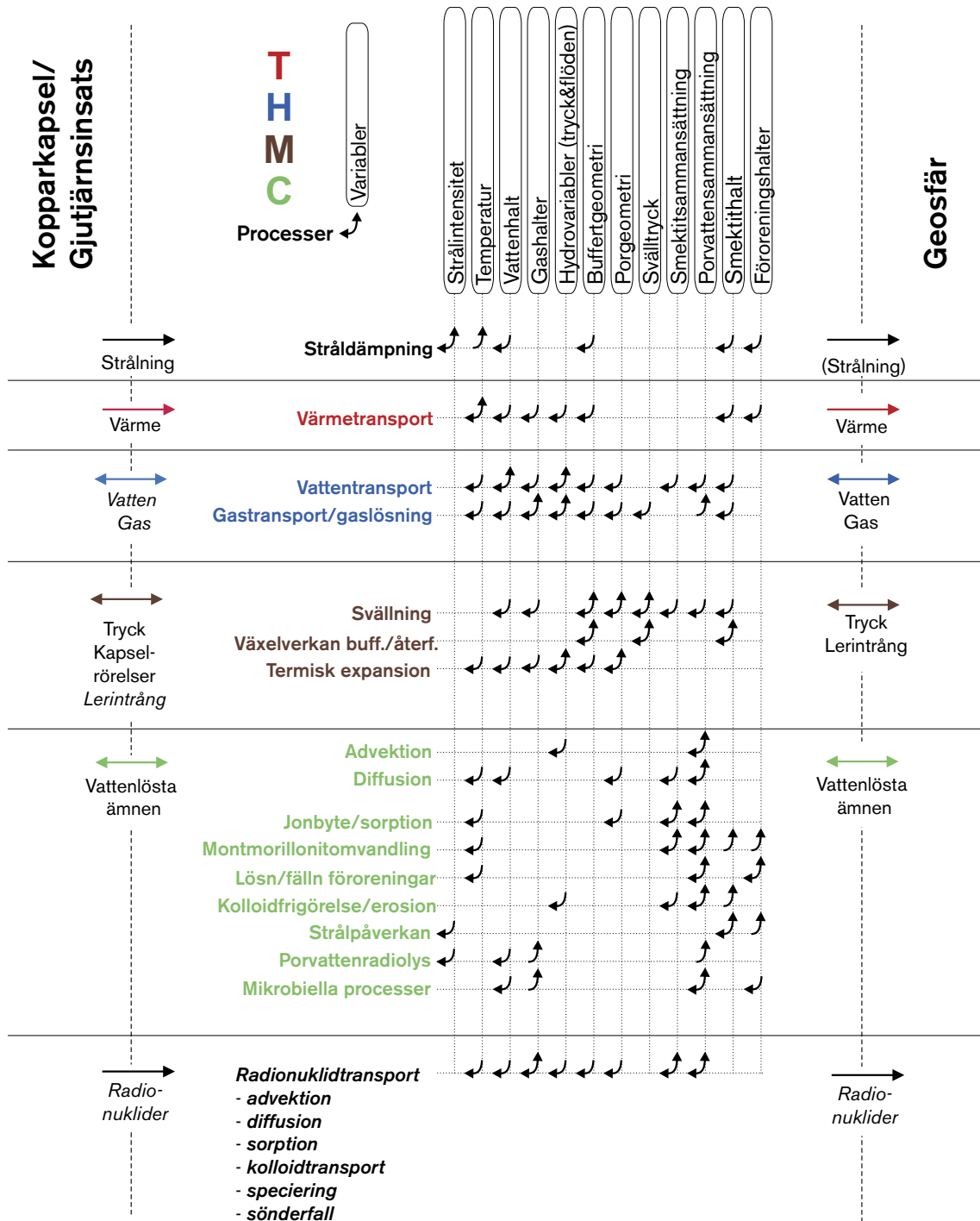
För säkerhetsanalysen behövs en detaljerad beskrivning av systemet, i ett format som inte bara lämpar sig för att beskriva djupförvaret som det är byggt, utan även de förändringar som förvaret kommer att genomgå med tiden. En sådan systembeskrivning måste alltså kunna ta hänsyn till det föränderliga tillståndet hos djupförvaret och processer och kopplingar som orsakar dessa förändringar. Formatet som valts här är en utveckling av det som används i säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/.

Systemet delas in i delsystemen bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, geosfär och biosfär. Varje delsystem karakteriseras av flera tidsberoende variabler. Bufferten karakteriseras t ex av variablerna temperatur, densitet, svälltryck, kemisk sammansättning etc. Variablerna är vanligtvis funktioner både rum och tid. Inom ett visst delsystem kan många processer agera över tiden för att ändra systemets status. Exempel från bufferten är värmetransport, vattenupptagning, svällning, kemisk nedbrytning och jonbyte.

Variabler och processer representeras i ett processdiagram, ett för varje delsystem. Figur 2-3 visar processdiagrammet för bufferten. Diagrammet visar även vilka variabler som påverkar en viss process, liksom inverkan av en viss process på variablerna. Även samverkan över delsystemets avgränsningar beskrivs.

Kopplad till processdiagrammet är processrapporten som innehåller en detaljerad dokumentation av den vetenskapliga förståelsen för alla processerna, av hur de behandlas i säkerhetsanalysen etc. Mera detaljerade redogörelser för de relevanta processerna och innehållet i processrapporten finns i avsnitten 2.5 respektive 2.7.

# Buffert/Återfyllning



**Figur 2-3.** SR 97-version av processdiagrammet för bufferten. Termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer listas i vänster kolumn, medan variablerna anges i översta raden. Samverkan mellan variabler och processer beskrivs av pilar i diagrammet. Processer och samverkansfenomen i kursiv stil uppträder endast om kopparkapseln skadas.

## 2.5 FEP-databas

I förberedelserna för säkerhetsanalysen SR-Can har SKB ytterligare utvecklat sin databas över förhållanden, händelser och processer (eng. Features, Events and Processes, FEPs) som är relevanta för den långsiktiga säkerheten i ett djupförvar för kärnavfall. Dokumentationen av detta arbete är under framtagning och kommer att presenteras som en teknisk rapport när databasen är mer färdig. SR 97-versionen av databasen har jämförts med NEA:s internationella FEP-databas för att garantera att alla relevanta faktorer i den sistnämnda beaktas. Strukturen hos databasen är nära besläktad med formatet för systembeskrivningen, som beskrivs ovan. Databasen är alltså strukturerad kring

- processer inom systemavgränsningarna, relevanta för den långsiktiga säkerheten,
- faktorer som påverkar initialtillståndet för djupförvaret, antingen direkt hänförliga till en specifik variabel eller till initialtillståndet i allmänhet,
- externa faktorer relevanta för den långsiktiga säkerheten, t ex klimatutveckling och mänskligt intrång.

Så gott som alla FEP i NEA-databasen kunde antingen hänföras till en av dessa kategorier eller bedömas som irrelevanta för KBS-3-systemet.

För alla processer som behandlats i SR 97-processrapporten, dvs de flesta processerna i den nya databasen, har relevanta delar av SR 97-processrapporten lagrats i databasen som en utgångspunkt för en uppdaterad dokumentation.

I SR-Can kommer flera FEP att behandlas än i SR 97. Behandlingen av både FEP för initialtillståndet och externa FEP är betydligt mera genomarbetade och resultatet av dessa ansträngningar kommer att användas i valet av scenarier. Listan över interna processer liknar den i SR 97 men processerna kommer att behandlas mera systematiskt.

Ytterligare arbete kring FEP-databasen kommer att genomföras som del av arbetet med att definiera initialtillstånd för djupförvaret, att uppdatera processdokumentationen och hantera systemets föränderliga randvillkor. Se vidare om dessa verksamheter nedan.

## 2.6 Initialtillstånd

En viktig del säkerhetsanalysen SR-Can är definitionen av initialtillstånd för djupförvarssystemet, dvs tillståndet hos systemet från vilket analysen av den långsiktiga utvecklingen börjar. Nedan beskrivs översiktligt några principer för hantering av initialtillståndet i SR-Can.

För många aspekter av bedömningen av den långsiktiga säkerheten är det praktiskt att låta initialtillståndet vara det som råder för kapseln, bufferten och återfyllningen omedelbart efter deponering. Emellertid, så som diskuteras t ex i SR 97, är det inte så enkelt att definiera en tidpunkt för initialtillstånd eftersom djupförvaret kommer att byggas och driftsättas stegvis. Icke desto mindre kommer de flesta faktorer av betydelse för den långsiktiga säkerheten kring ett deponeringshåll att vara tämligen lika, oberoende av tidpunkten för deponering, och SR 97-analysen har visat att det är meningsfullt att definiera initialtillståndet på detta sätt för många aspekter på den långsiktiga utvecklingen.



Det finns emellertid vissa faktorer som utvecklas under stegvis byggnads-, deponerings- och återfyllningsarbete i förvaret. Bland dessa kan nämnas grundvattnets flöde och sammansättning, liksom berymekaniska effekter av brytningsarbetet. För dessa aspekter är deponeringstidpunkten inte nödvändigtvis en naturlig utgångspunkt för en analys av den långsiktiga utvecklingen.

För analys av den långsiktiga säkerheten betraktas djupförvarssystemet som ett antal tids- och rumsberoende variabler som beskriver t ex geometri, temperatur, hydrauliska förhållanden etc, se avsnitt 2.4 och även SR 97 Huvudrapport Volym I, kapitel 5 och 6 /SKB, 1999a/. Uppgiften att beskriva initialtillståndet kan därför sägas vara att tilldela initialvärden till dessa variabler. Detta är tämligen enkelt då det gäller data som deponeringshålens mått, medan t ex uppgiften att beskriva initiala defekter i kapselförslutningen är ett stort åtagande för SKB, liksom inte minst beskrivningen av initialtillstånd hos berggrund och biosfär vid platsen.

### **2.6.1 Krav och faktorer att beakta**

Beskrivningen av initialtillståndet ska inte bara täcka ”normala” eller ”specificerade” förhållanden utan även avspegla resultaten av en analys av vilka avvikelser från dessa förhållanden som rimligen kan förväntas. Det finns många faktorer som måste beaktas vid definition av initialtillstånd:

- En referensutformning av KBS-3-systemet inklusive specifikationer av bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, geosfär och biosfär.
- Öppna konstruktionsfrågor. Bland dessa kan nämnas val av buffert- och återfyllningsmaterial, val av brytningsteknik, särskilt för deponeringstunnlar (borrning eller borrning/sprängning), materialspecifikationer för tunnelpluggar och fastställande av injekteringsmetoder. Modelleringsbehov och databehov för olika konstruktionsvarianter måste fastställas.
- Eventuella avvikelser från specifikationerna i referensutformningen. Notera emellertid att t ex ett visst (litet) antal initialt defekta kapslar kan ingå i referensutformningen, se avsnitt 6.4.1. I detta sammanhang fordras ett beslut om huruvida SR-Can ska behandla långsiktiga konsekvenser av ofullständig förslutning/förlängd driftfas för förvaret.
- Överföring (och eventuell omvandling/tolkning) av relevanta data från platsbeskrivningsmodellen (geosfär och biosfär).
- En förvarslayout inom platsmodellen.
- Behandling av utvecklingen av bergsförhållanden, som grundvattnets flöde och sammansättning under stegvis byggnads-, deponerings- och återfyllningsarbete i förvaret.
- Missöden under förvarsdriften, med konsekvenser för initialtillståndet.
- Resultat av FEP-analys.

Några av dessa faktorer och deras vidare hantering diskuteras i närmare detalj nedan.

Det är viktigt att initialtillståndet definieras tidigt i SR-Can-projektet, eftersom efterföljande steg kräver detta. Uppgiften kräver en undergrupp inom SR-Can-projektet med deltagande av generalister inom säkerhetsanalys samt specialister på förvarsutformning.

## 2.6.2 Resultat av FEP-analys

FEP-analysen för SR-Can har hittills resulterat i ett antal frågor som behöver beaktas vid definitionen av initialtillstånd. Dessa finns inlagda i FEP-databasen i SR-Can. Många av dessa gäller effekten på initialtillståndet från utveckling av systemet under brytning och drift.

FEP identifierade som relaterade till initialtillståndet i allmänhet eller till specifika variabler har granskats. Allmänna FEP för initialtillstånd har vidare klassificerats som antingen hörande till en specifik variabel, eller som "Konstruktionsavvikelse", "Missöden" eller lämnats kvar som "Allmänna".

I den vidare planeringen av arbetet kommer följande att beaktas:

- Alla FEP som hänförs till initialtillstånd ska granskas på nytt och en åtgärdsplan beslutas och dokumenteras för var och en.
- Beroende på typen av FEP (påverkande variabel, konstruktionsavvikelse eller missöde) ska diskussionen om åtgärdsplanen beakta det allmänna angreppssättet för hantering av i) utveckling av bergsförhållanden under förvarets drift, ii) konstruktionsavvikelse och iii) missöden, så som diskuteras nedan. Det innebär att flera FEP kommer att läggas till listan över frågor under dessa kategorier.
- Typiska beslut för en FEP skulle vara att den i) redan har behandlats, ii) att den inte är relevant eller iii) att det finns behov av att uppdatera planerade analyser för utveckling/konstruktionsavvikelse eller missöde.
- Detaljerade modellerings-/datakonsekvenser av de FEP som kräver vidare analyser kommer att undersökas/beslutas.

## 2.6.3 Information från platsbeskrivningen

Överföring (och eventuell omvandling/tolkning) av relevanta data för platsbeskrivningsmodellen av berggrunden kommer att bli en stor uppgift i definitionen av geosfärens initiala tillstånd. Platsbeskrivningsmodellen är en integrerad beskrivning av platsen och dess regionala miljö vad gäller aktuellt tillstånd och naturligt pågående processer. Den täcker geologi, bergsmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper och ekosystem. Beskrivningen görs i regional och lokal skala och ska uppfylla behoven för säkerhetsanalys och projektering /SKB, 2000/.

Efter hand som undersökningarna går framåt kommer olika versioner av platsbeskrivningen att tas fram. En viss version av beskrivningen är kopplad till en viss datafrys. SR-Can kommer till en början att utnyttja beskrivningen Forsmark version 1.1 som exempel, medan versionerna 1.2 för Forsmark och Simpevarp ska användas för det avslutande steget av SR-Can. SR-Site kommer att baseras på senast tillgängliga platsbeskrivning. Även om modellerna ska uppdateras med tiden är avsikten att redan version 1.1 ska ha i princip samma innehåll som senare versioner. Den huvudsakliga skillnaden mellan tidiga versioner och senare ligger i tilltron till beskrivningen och även i att en senare version kan innehålla flera bergområden och andra geometriska detaljer. Fortfarande kommer dock det mesta av data i tunnelskala (och mindre) att ges i form av statistik även i senare versioner. Endast storskaliga egenskaper kommer att behandlas deterministiskt. Det betyder att procedurer som utvecklas och visar sig fungera för version 1.1 bör vara fullt tillämpbara även när senare versioner av platsbeskrivningen används.

I SR-Can blir det nödvändigt att utveckla och påvisa en procedur för hur platsbeskrivningen ska användas för att definiera initialtillståndet. Dataöverföringen bör vara tämligen enkel. Flera beskrivningar, som spricknätverk, transmissivitetfördelning etc kommer att ingå i datorprogrammen för säkerhetsanalysen, eftersom platsbeskrivningen och säkerhetsanalysen delvis kommer att använda samma program. Emellertid kräver några frågor särskild uppmärksamhet:

- Förvarskonstruktion och -drift kan ändra förhållandena i platsbeskrivningen. Några av ändringarna kan vara reversibla, medan andra måste beaktas. Denna fråga diskuteras närmare i avsnittet nedan.
- Diskussionen kring dataöverföring i kapitel 3 av /SKB, 2002/ ska tas upp på nytt för att undersöka potentiella problem och andra frågor som ska lösas för SR-Can. Skalan hos erforderliga indata och specifika osäkerhetskonsekvenser (är det möjligt att formulera ”pessimistiska fall”, användning av ”generiska data” etc) måste fastställas. Osäkerhetshandlingarna ska ligga i linje med det övergripande angreppssättet på data-osäkerhet som ska tillämpas för SR-Can.
- En viktig del av platsbeskrivningen är ett uttalande om graden av tilltro. Säkerhetsanalysen måste sätta in detta i ett perspektiv och granska styrkan hos argumenten. Är delar av platsbeskrivningen med stor tilltro relevanta för säkerhetsredovisningen? Är delarna av beskrivningen där tilltron är låg verkligen av vikt för säkerheten? Vidare, är uttalandena om tilltro väl grundade? Om inte – hur skulle de kunna förbättras? För SR-Can måste förberedas hur värderingarna av tilltro ska hanteras. Även platsbeskrivningsmodelleringen skulle behöva återkoppling (hjälp) med formuleringen av tilltro. En utgångspunkt skulle kunna vara att beakta strukturen som ges av /SKB, 2002/ avsnitt 4.3.1.

#### **2.6.4 Utveckling av bergsförhållanden under förvarsdrift**

Stegvis byggnads-, deponerings- och återfyllningsarbete i förvaret påverkar förhållanden som grundvattnets flöde och sammansättning. Systemet av drifttunnlar kommer att förbli öppet under förvarets hela drifttid, medan olika deponeringstunnlar kommer att undersökas, brytas, användas för deponering och återfyllas inom mycket kortare tid (typiskt 5 år).

Den oundvikliga dräneringen och inflödet till öppna delar av förvaret kommer att utgöra den huvudsakliga hydrauliska sänkan i förvaret så länge det finns öppna underjordiska rum. Detta kommer att påverka grundvattnets flödesriktning, flödeshastighet och även grundvattensammansättningen. Ytvatten med löst syre och organiskt material kommer att dras nedåt. Djupt liggande saltvatten kommer att dras upp mot förvaret. Omfattningen av dessa förändringar kommer att bero på faktiska flöden i öppna tunnlar, som i sin tur kan styras av injekteringseffektiviteten och på hur väl tunnlar är anslutna till ytan, samt på eventuella djupt liggande saltvattenreservoarer. Information om platsförhållanden ska finnas tillgängliga i platsbeskrivningen.

När en förvarstunnel är återfylld och pumpningen avbryts kommer det direkta inflödet till dessa delar att upphöra, men det omgivande berget är fortfarande påverkat av dränering av andra, öppna tunnelavsnitt. När hela förvaret är förslutet och återfyllt inleds en allmän återmätning. Det återmättade tillståndet kommer troligen att vara mycket likt förhållandena före brytningen, men några kvarstående effekter kan föreligga, och tiden för att nå detta ”naturliga tillstånd” beror på faktiska bergförhållanden, tidsvariationen hos randvillkor etc.

I närzonen kring enskilda deponerade kapslar kommer det omgivande grundvattentrycket troligen att öka ganska snabbt. Därför kan, vad beträffar deponeringshålens återmättnad och termiska analyser, det faktum att andra delar av förvaret kan vara öppna eventuellt försummas.

Tunnelbyggnad får mekaniska effekter på närzonens berg, både i form av kopplade termohydromekaniska effekter och av injektering och andra metoder för att tätta berget. Inverkan är troligen endast lokal. I tidigare analyser har detta beaktats genom antagande av EDZ med ökad permeabilitet i tunnelns riktning. Emellertid har tidigare antaganden med avseende på EDZ haft tämligen dåligt stöd. Därför behöver grunden för dessa antaganden tas upp till förnyad granskning.

Även om det öppna förvaret kan ha relativt stor inverkan på berggrundsförhållandena är behovet av att behandla detta i säkerhetsanalysen även kopplat till frågan om huruvida det kommer att förekomma några radionuklidutsläpp under ”övergångstiden” eller ej. Om tidiga utsläpp skulle kunna uppträda vore det nödvändigt att analysera transporten i ett helt annat fält av transportvägar (och med andra egenskaper) i jämförelse med det ”mätade fallet”. Om emellertid huvudsyftet är att undersöka inverkan på isoleringsfunktionen under driftfasen, kan ambitionsnivån för noggrannheten i beskrivningen av drifts- och återmättnadsfasen sänkas.

I den vidare planeringen av arbetet kommer följande att beaktas:

- Fastställa förväntad tid för brytning, drift och förslutning av deponeringstunnlar, (dvs om de bara kommer att vara öppna i 5 år etc).
- Beakta om det kommer att finnas behov av analyser av ”tidig” radionuklidspridning eller om fokus ska ligga på undersökning av effekter med potentiell inverkan på långsiktiga isolerings- och transportegenskaper.
- Tillsammans med projekteringsgruppen diskutera behovet av modellering av grundvattenflöde (och transport av viktiga komponenter) för ett öppet förvar och planera ytterligare åtgärder.
- Omvärdera grunden för EDZ-antaganden och för långsiktig hantering av termohydromekaniska effekter i närzonen och injektering.
- Studera om det går att välja några ”typsituationer” (som olika TDS-nivåer, olika grundvattentryck, olika närzonspermeabiliteter etc), som kan täcka resultatet av analyser med avseende på hur närzonsmiljön faktiskt skulle kunna vara. Eventuellt är djupförvarssystemet robust med avseende på många olika miljöer, vilket skulle kunna betyda att det inte är nödvändigt att förutsäga den exakta utvecklingen av förhållandena.
- Bedöma konsekvenserna för närzonsutveckling, grundvattenflöde och grundvattensammansättning över tiden, med beaktande av alla relevanta FEP för initialtillstånd. Täcks konsekvenserna av förvarsdriften av vidtagna åtgärder? Om inte, vilka ytterligare åtgärder ska vidtas?

### 2.6.5 Missöden

Ett preliminärt angreppssätt för hantering av missöden skulle vara att utesluta svåra missöden, som brand, explosioner, sabotage och omfattande översvämningar. Orsakerna till detta är i) sannolikheterna för sådana händelser är små och ii) om de uppträder skulle detta vara känt före förslutning av förvaret, så att motåtgärder och bedömning av möjliga effekter på den långsiktiga säkerheten kan baseras på den specifika faktiska händelsen.

Listan över missöden resulterande från FEP-analysen beaktas och ett slutgiltigt beslut fattas om huruvida det kan anses som acceptabelt att inte analysera allvarliga missöden. Om så inte är fallet ska valet av missöden som ska undersökas samt modelleringskonsekvenserna bedömas.

## 2.6.6 Val av initialtillstånd

Ett initialtillstånd för säkerhetsanalysen definieras i detalj genom tilldelning av initialvärden till alla variabler som beskrivs i SR-Can-databasen. Ofta ges värdena i form av intervall som täcker osäkerhetsfaktorer med avseende på initialtillståndet för variabeln i fråga.

För SR-Can analyseras ett referensinitialtillstånd med varianter och potentiellt ett urval av alternativa initiala tillstånd. Det huvudsakliga kriteriet som avgör om ett initialtillstånd ska betraktas som ett alternativ eller bara som en variant av referenstillståndet är dess inverkan på den långsiktiga säkerheten i jämförelse med referensinitialtillståndet. Den detaljerade klassificeringen av initialtillstånd är i viss mån godtycklig. Detta är emellertid inget problem så länge alla relevanta tillstånd täcks, antingen som varianter eller som alternativa tillstånd.

Återigen bör noteras att referenstillståndet täcker hela uppsättningen av kapslar och deponeringshål i förvaret. Det ska alltså innefatta sådana barriärdefekter som statistiskt skulle kunna förväntas inom uppsättningen. Detta skulle t ex kunna betyda att ett visst litet antal initialt defekta kapslar också ingår i initialtillståndet (se vidare i avsnitt 6.4.1) och att en hel rad grundvattenomsättningar kring deponeringshålen ska täckas in. Detta är i enlighet med konstruktionsspecifikationerna för förvaret och även med definitionen av huvudscenariot i SKIFS 2002:1.

## 2.7 Processbeskrivningar

En hörnsten i säkerhetsanalysen SR 97 var den så kallade processrapporten /SKB, 1999b/, som innehåller en detaljerad beskrivning av alla identifierade relevanta långsiktiga processer för bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. Med ett föreskrivet format beskrevs varje process med avseende på allmän förståelse för processen, återstående osäkerheter och behandling av processen i säkerhetsanalysen för ett antal scenarier.

För SR-Can kommer en ny och vidareutvecklad version av processrapporten att tas fram. Så som beskrivs ovan har för varje process texten i SR 97-versionen av processrapporten lagrats i SKB:s FEP-databas. Denna dokumentation utgör utgångspunkt för en ny version. Så som också beskrivs ovan har listan över relevanta processer reviderats och utökats något, genom jämförelse med andra databaser. Dessutom har återfyllningen tagits in som ett delsystem i sig själv, i stället för att beskrivas tillsammans med bufferten som i SR 97.

De uppdaterade processbeskrivningarna kommer alltså att lagras i databasen och en uppdaterad version av processrapporten kan när som helst tas fram mer eller mindre automatiskt genom att man begär rapport om ett specificerat format från databasprogrammet. En SR-Can-version av rapporten kommer att definieras och sparas i databasen.

### 2.7.1 Struktur för processbeskrivningar

I den nya versionen kommer alla identifierade processer att dokumenteras och behandlas med hjälp av följande preliminära mall, där många av rubrikerna är desamma som i SR 97-rapporten:

### ***Översikt/allmän beskrivning***

Under denna rubrik ges en allmän beskrivning av kunskapen kring processen. För de flesta processer kommer innehållet i processrapporten SR 97 att ligga till grund. All text kommer emellertid att ses över och uppdateras efter behov.

### ***Påverkande/påverkade variabler***

För varje variabel i aktuellt delsystem diskuteras och dokumenteras om den påverkar processen på betydande sätt. På motsvarande sätt kommer variabler som påverkas av processen att systematiskt diskuteras och dokumenteras. Databasprogramvaran ska användas för att säkerställa att påverkansdokumentationen blir fullständig.

### ***Randvillkor***

Randvillkoren för varje process diskuteras. Dessa avser ränderna för aktuellt delsystem. För t ex buffertprocesser utgörs ränderna av buffertens gränssnitt mot kapseln, mot väggarna i deponeringshålen och mot återfyllningen. Processerna för vilka randvillkor behöver beskrivas rör i allmänhet transport av material eller energi över ränderna. För t ex kemiska processer som uppträder inom ett delsystem, t ex illitisering i buffert, kommer diskussionen om randvillkor att avse randvillkoren för relevanta transportprocesser i bufferten, dvs advektion och diffusion.

### ***Modellstudier/experimentella studier***

Modellstudier och experimentella studier av processen sammanfattas. Denna dokumentation kommer att utgöra huvudkällan för information om många av processerna.

### ***Tidsperspektiv***

Tidsskalan i vilken processen uppträder dokumenteras om en sådan tidsskala kan definieras.

### ***Naturliga analogier/observationer i naturen***

I relevanta fall dokumenteras naturliga analogier till och/eller observationer i naturen av processen under denna rubrik. Se vidare i avsnitt 2.12.4 för användning av denna information i säkerhetsanalysen.

### ***Hantering i säkerhetsanalys***

Under denna rubrik väljs ett av följande alternativ för behandling av processen i säkerhetsanalysen (besluten och experterna som har fattat dem dokumenteras):

1. Processen försummas. Utgående från informationen som sammanfattas i beskrivningen av processen under föregående rubrik beslutas att processen ska försummas.
2. Processen förenklas konceptuellt i pessimistisk riktning, så att den inte kräver någon kvantitativ behandling i säkerhetsanalysen. Ett exempel på detta i SR 97 är processen ”Metallkorrosion” i systemdelen bränsle. Metalldelar postuleras vara fullständigt och omedelbart korroderade om och när vatten penetrerar en skadad kapsel och kommer i kontakt med bränslet. Deras innehåll av radionuklider postuleras upplösas omedelbart i det inträngande vattnet.

3. Processen ingår i en integrerad modellberäkning i säkerhetsanalysen. Ett exempel på detta är integrerad modellering av radionuklidutsläpp från bränsle, följt av radionuklidtransport i kapsel, buffert, geosfär och biosfär, som leder till doskonsekvenser för människor. I dessa fall fordras referens till tillgängliga modelleringsverktyg.
4. Processen studeras i en separat modell som inte är direkt integrerad i säkerhetsanalysen. Resultaten av den separata studien används i analysen av olika scenarier för att bedöma konsekvenserna av fenomenet i fråga på utvecklingen av systemet. Även i detta fall ska modelleringsverktyget eller modellberäkningen i sig dokumenteras. Ett exempel på detta är behandling av deformation av gjutjärnsinsatsen. Denna har modellerats separat för flera belastningssituationer, inklusive höga isostatiska belastningar som förväntas under nedisningar, dynamiska belastningar som potentiellt kan orsakas av jordskalv och ojämn statisk belastning på grund av ojämn svällning av bufferten. Belastningssituationerna i dessa separata studier kan jämföras med dem som uppträder över tiden i olika scenarier i säkerhetsanalysen. Från dessa jämförelser går det att dra slutsatser om kapselns integritet över tiden när olika scenarier analyseras. Därvid används processrapporten som en referens.

I många fall kommer beslutet om hur en viss process ska behandlas att bero på platsspecifik information.

Som resultat av informationen under denna underrubrik sammanställs en avbildning av alla processer på hanteringsmetoder i analysen. I tillämpliga fall kommer relevanta modeller att tas fram. En första version av en sådan avbildning, som delvis täcker processerna i processrapport SR 97, visas i tabell 2-1.

### **Osäkerheter**

Givet vald hantering i säkerhetsanalysen kommer olika typer av osäkerheter som är associerade till processen att sammanfattas.

*Osäkerheter i mekanistisk förståelse:* Osäkerheten i den allmänna förståelsen av processen diskuteras utgående från föregående dokumentation och med målet att besvara frågan: Förstår vi de grundläggande vetenskapliga mekanismerna bakom processen? Alternativa modeller kan ibland användas för att illustrera denna typ av osäkerhet.

*Osäkerheter orsakade av modellförenklingar:* I de flesta fall innehåller den kvantitativa representationen av en process förenklingar. Dessa kan utgöra en betydande källa till osäkerhet i beskrivningen av systemets utveckling. Denna aspekt på kvantitativ behandling kommer att diskuteras för tillgängliga verktyg. Alternativa modeller kan ibland användas för att illustrera denna typ av osäkerhet.

*Indata och dataosäkerheter:* Uppsättningen nödvändiga indata för att kvantifiera processen ska dokumenteras. Den vidare behandlingen av viktiga indata och osäkerheter i indata ska beskrivas i en Datarapport, till vilken kommer att refereras i tillämpliga fall. Planerna för en Datarapport utvecklas i avsnitt 2.11.

### **Referenser**

En lista över referenser som används i processdokumentationen.

**Tabell 2-1. Avbildning av processer i processrapport SR 97 på tillgängliga verktyg för kvantitativ behandling i säkerhetsanalysen. Denna version av tabellen är ofullständig och är endast avsedd som en demonstration. Förkortningar som används: S: Systemmodell, se avsnitt 8.1, F: försummad, P: separat processmodell, E: enkel beräkning (skulle potentiellt kunna ingå i systemmodellen), H: hydraulisk modell, se avsnitt 5.2 och 5.4, NF: modell för radionuklidtransport i närzonen, se avsnitt 8.2.2, FF: modell för radionuklidtransport i fjärrzonen, se avsnitt 5.3, AT: analytisk transportmodell, se avsnitt 8.2.**

	Försummad	System Model	Separat Processmodell	Enkel beräkning	Hydromodeller	När zons RN Transportmodell	Fjärrzons RN Transportmodell	Analytisk RN Transportmodell	Anmärkningar
<b>Bränsle</b>									
Radioaktivt sönderfall		S				NF		AT	
Inducerad fission			P						P: Se TR-02-07
Stråldämpning/ värmegenerering		S	P						Värmegenerering: TR-99-02
Värmetransport		S	P						TR-99-02
Vatten- och gastransport; kokning/ kondensation									
Termisk expansion/kapslingsbrott									Kapslingsbrott pesimistiskt överdrivet, ingen modellering
Advektion						NF		AT	Hålrums som omrörd tank
Diffusion						NF		AT	Hålrums som omrörd tank
Restgasradiolys/syrabildning				E					
Vattenradiolys				E					
Metallkorrosion									Pessimistiskt förenklat, ingen modellering
Bränsleupplösning			P			NF		AT	
Lösning av gapinventarium						NF		AT	
Speciering Fe korr. prod.			P						P: TR-97-33
Speciering radionuklider			P						P: TR-97-33
Heliumbildning		S							
Radionuklidtransport						NF		AT	
<b>Kapsel/Insats</b>									
Stråldämpning			P						
Värmetransport		S	P						
Deformation Fe insats			P	E					P: Isostatiskt kollapslast se PPM-95-3420-11, complexa statiska ojämna belastningar se PPM-98-3420-33, dynamisk last se TR-92-30; C: Enkla statiska ojämna lastfall
Deformation Cu kapsel			P						
Termisk expansion				E					
Korrosion Fe		S							
Spänningskorrosion Fe									



Stråleffekter Fe										Försummas baserat på experimentella data
Galvanisk korrosion										
Korrosion Cu		S								
Spänningskorrosion Cu										
Stråleffekter Cu										Försummas baserat på experimentella data
<b>Buffert</b>										
Stråldämpning										
Värmetransport		S	P							P: Integrerat med bränsle och kapsel, se t ex TR-99-02
Vattentransport		S								P: Mättnadsfas se TR-99-41; Vatteninträning i defekt kapsel se TR-97-19 och TR-99-34
Gastransport/lösning			P							
Svällning		S	P							P: TR-99-41 (omättad fas)
Interaktion buff/återf.		S	P							P: TR-99-41 (omättad fas)
Termisk expansion			P							P: TR-99-41 (omättad fas)
Advektion			P							P: TR-99-41 (omättad fas)
Diffusion		S	P							Genom Qeq; P: TR-99-29
Jonbyte/sorption		S	P							P: TR-99-29
Montmorillonitombildning										Massbalansberäkning, se Processrapport
Lösning/fällning föroreningar		S	P							P: TR-99-29
Kolloidfrigörelse/erosion	F									Försummas baserat på experimentella data
Stråleffekter	F									Försummas baserat på experimentella data
Porvattenradiolys	F									Försummas baserat på experimentella data
Mikrobiella processer	F									Försummas om buffertdensitet överskrider 1800 kg/m <sup>3</sup>
Radionuklidtransport										
– advektion	F									Försummas för mättad buffert
– diffusion							NF		AT	
– sorption							NF		AT	
– kolloidtransport	F									Försummas för mättad buffert med densitet över 1700 kg/m <sup>3</sup>
– speciering			P							
– sönderfall							NF		AT	AT: Kedjesönderfall behandlas inte
<b>Återfyllning</b>										<b>De flesta återfyllningsprocesser behandlas inte explicit i SR 97</b>
Stråldämpning										
Värmetransport										
Vattentransport										
Gastransport/gaslösning										
Svällning										
Interaktion buffert/återfyllning										
Termisk expansion										
Advektion										
Diffusion										
Jonbyte/sorption										
Montmorillonitombildning										
Lösning/fällning föroreningar										
Kolloidfrigörelse/erosion										

Stråleffekter									
Porvattenradiolys									
Mikrobiella processer									
Radionuklidtransport									
– advektion									
– diffusion							NF		
– sorption							NF		
– kolloidtransport									
– speciering									
– sönderfall							NF		
<b>Geosfär</b>									
Värmetransport		S	P						P: Integrerat med buffert, se t ex TR-99-02
Grundvattenflöde					H				H: Beräknar även transportegenskaper, flera modeller tillgängliga
Gasflöde/-lösning									
Rörelse i intakt berg									
Reaktivering			P						
Sprickbildning									
Tidsberoende deformationer									
Termisk rörelse			P						
Advektion/blandning			P						
Diffusion									
Reaktioner grundvatten/berg	F								
Lösn./fälln. sprickfyllnadsmineral			P						
Mikrobiella processer									
Nedbrytning inorg. mtrl				E					
Kolloidbildning	F								
Gasbildning/gaslösning									
Metanisbildning	F								
Salt utfrysning	F								
Radionuklidtransport									
– advektion							FF	AT	
– matrisdiffusion							FF	AT	
– sorption							FF	AT	
– kolloidtransport			P						
– transport i gasfas									Geosfären pessimistiskt kortsluten
– sönderfall							FF	AT	AT: Kedjesönderfall behandlas inte

Expertbedömningar kommer att genomsyra alla steg i processdokumentationen. Detta måste tydligt konstateras och dokumenteras.

Biosfärprocesser ska dokumenteras separat i en biosfärprocessrapport som får ett delvis annorlunda format, se vidare i kapitel 4.

I kapitlen 3 till 6 diskuteras hanteringen av frågor kring många centrala processer i bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, geosfär och biosfär, samt klimatförändringar. Mycket av utvecklingarna som skisseras i dessa kapitel kommer att resultera i uppdaterad information i processrapporten för SR-Can.

## 2.8 Hantering av föränderliga externa förhållanden och yttre händelser

De externa förhållandena av systemet som definieras i avsnitt 2.4 torde komma att förändras dramatiskt under analysperioden en miljon år. Framför allt kommer den globala klimatutvecklingen att medföra föränderliga förhållanden av osäker natur. Dagens klimat torde följas av flera cykler av permafrost och glaciala förhållanden under analysperioden. Tidssekvensen för dessa förändringar styrs av cykliska astronomiska fenomen som påverkar solinstrålningen. Även om framtida solinstrålning kan prognosticeras väl är det svårt att uppskatta motsvarande påverkan på klimatet, på grund av vår begränsade förståelse för klimatsystem och även på grund av tillkommande osäkra drivkrafter som av människan orsakade växthusfenomen. Ett annat storskaligt fenomen som påverkar systemets ränder orsakas av tektoniska rörelser och som ger gradvis ökande spänningar i berget.

Den vidare analysen kräver en mera ingående beskrivning av randvillkoren för att i) välja en uppsättning scenarier som ger en rimlig täckning av möjlig framtida utveckling och ii) tillåta analys av dessa scenarier med avseende på slutförvarets säkerhet i efterföljande steg av bedömningen, med hänsyn till att de risker som är associerade med förvaret måste uppskattas.

Beskrivningen av framtida klimat och andra externa förhållanden är en förutsättning för biosfärbeskrivningar och beskrivningar av flera framtida förhållanden i berget, som temperatur, grundvattnets flöde, tryck och sammansättning, samt mekaniska laster och konsekvenser av dessa.

Det finns även många yttre händelser, som mänskligt intrång, som skulle kunna påverka förvaret.

Huvudlinjerna i den förväntade långsiktiga utvecklingen av djupförvarssystemets ränder har beskrivits i flera tidigare säkerhetsanalyser, senast SR 97, och i flera rapporter från FoU-projekt. Den vidare hanteringen av föränderliga externa förhållanden och yttre händelser kommer att löpa längs tre linjer i SR-Can:

- a) Med klimatscenariot i SR 97 som utgångspunkt kommer tillgänglig information med avseende på framtida klimatuveckling att sammanställas, tillsammans med klimatrelaterade externa FEP i SR-Can-databasen. Målen är i) att definiera en uppsättning tidsberoende externa förhållanden som ska användas i scenariovalet och ii) att hantera analyserna av konsekvenser som dessa randvillkor kommer att ha på djupförvarssystemet. Detta arbete behandlas i närmare detalj i kapitel 3.
- b) Följderna för förvaret mot bakgrund av ett antal kritiska, ofta stiliserade, externa förhållanden analyseras som en del av den preliminära analysen som beskrivs i avsnitt 2.9.
- c) Ytterligare analys av externa händelser. Behandlingen av framtida mänskliga intrång i SR 97 samt FEP med avseende på yttre händelser i SR-Can-databasen är två viktiga utgångspunkter för ytterligare hantering av dessa frågor. Då det gäller hanteringen av intrång ges ytterligare detaljer i kapitel 7.

Vad beträffar punkt b) ovan ger avsnitt 2.9.3 några exempel på viktiga externa förhållanden som måste specificeras och för vilka konsekvenserna av framför allt de tillverkade komponenterna i förvaret ska analyseras.

## 2.9 Preliminära analyser

### 2.9.1 Syften

Eftersom många initialtillstånd och randvillkor resulterar av stegen ovan kommer preliminära bedömningar av säkerhetsrelaterade konsekvenser av dessa att göras, i första hand för att kunna göra ett välgrundat val av scenarier i efterföljande steg och optimera ansträngningarna som satsas på att fastställa dataosäkerheter.

Dessa analyser fokuserar på den totala utvecklingen av systemet. Såväl kapslarnas isoleringspotential som systemets fördröjande kapacitet kommer att analyseras. Målet är att inkludera så många processer som möjligt i de preliminära analyserna, för att förstå huvudlinjerna av systemets utveckling.

Delar av de preliminära analyserna ska ingå i de formella scenarioanalyserna senare i projektet, medan andra delar kommer att förfinas med mera avancerade simuleringsmodeller och/eller data från t ex platsen som ska analyseras.

En ambition redan i de preliminära analyserna är att genomföra känslighetsanalyser, eftersom sådana inte bara utgör grund för valet av scenarier, utan även för det arbete som satsas på att fastställa data för de slutliga scenarioanalyserna.

Säkerhetsfunktionerna för förvaret är att isolera avfallet och fördröja radionuklidernas spridning om isoleringen skulle brytas. Tidigt i projektet, helst som del av de preliminära analyserna, ska barriäregenskaperna som bidrar till säkerhetsfunktionerna beskrivas i detalj. Exempel på sådana egenskaper är diffusionsegenskaperna hos bufferten och de reducerande förhållanden som tillhandahålls av den geologiska miljön. En sådan beskrivning är till nytta i t ex scenariovalet som måste bygga på förståelse för säkerhetsfunktionerna hos förvaret. Beskrivningen kommer att bygga på den som ges i SR 97 och i andra relevanta källor.

Ett annat syfte är att klargöra de olika tidsskalorna för förvarets utveckling, och de typer av analyser som krävs för olika tidsskalor.

Rollen för resultaten från de preliminära analyserna i den slutliga säkerhetsredovisningen återstår att fastställa. I fall där resultaten används direkt i val av eller efterföljande analys av scenarier, måste de vara grundligt dokumenterade i slutrapporteringen. Preliminära analyser som inte används som underlag för beslut och/eller ersätts av mera detaljerade studier inom scenarioanalyserna kan komma att uteslutas från slutrapporten.

### 2.9.2 Metoder för preliminära analyser

Tre huvudsakliga metoder kommer att användas för preliminära analyser:

1. Separata detaljanalyser av specifika frågor. Dessa är ofta studier som initierats som följd av tidigare bedömningar och som har pågått någon tid. Exempel är gränssättande uppskattningar av inverkan av jordskalv, inkluderande berg, buffert och kapsel liksom inverkan av isostatiska belastningar på kapseln.
2. Integrerad systemmodell. SKB utvecklar för närvarande en simuleringsmodell, se avsnitt 8.1, som integrerar ett antal processer inom djupförvarets utveckling. Modellen kan användas för att studera den termiska utvecklingen av hela systemet, den kemiska utvecklingen av buffert och återfyllning för olika initialförhållanden och randvillkor, kapselkorrosion för ett antal förhållanden, etc. Några processer behandlas förenklat,

men resultat av benchmark-test visar att resultaten är mycket lika dem som fås från mera avancerade modeller. Se tabell 2-1 för en preliminär redovisning av processer som hanteras i den integrerade modellen.

### 3. Preliminära, förenklade radionuklidtransportanalyser.

Dessutom kommer resultat från tidigare analyser, särskilt SR 97, att användas i tillämpliga fall.

## 2.9.3 Frågor att behandla

Följande är exempel på gränssättande förhållanden eller randförhållanden som kommer att behandlas i preliminära analyser.

### ***Inträngning av olika grundvattentyper***

Inträngning av grundvatten i) av glacialt ursprung (låg jonstyrka och eventuellt syresatt), ii) med varierande grad av salthalt, till återfyllning, buffert och kapsel kommer att studeras. Dessa är inte direkt randvillkor utan snarare extrema och i några fall orealistiska konsekvenser av flödesrandvillkor som kan vara svåra att kvantifiera under en glaciationscykel. Resultaten av dessa analyser kan därmed användas som gränsvärden för möjlig inverkan av sådana flödesrelaterade randvillkor. Även konsekvenserna av dagens grundvattensammansättning och cementporvatten kommer att analyseras.

### ***Konsekvenserna av jordskalv***

Konsekvenserna av fysiskt maximalt möjliga jordskalv i huvudstrukturer vid kandidatplatserna analyseras. Snart färdigställda studier av fältobservationer av jordskalvseffekter och modellsimuleringar av jordskalvskonsekvenser i berg, buffert och kapsel kommer att användas i denna analys, där tillämpning av respektavstånd till större sprickzoner kommer att vara en viktig del av metodiken.

### ***Konsekvenser av maximalt grundvattentryck***

Ett maximalt grundvattentryck under en nedisning och dess inverkan på framför allt kapselintegriteten studeras. Det maximala trycket i SR 97-analysen uppskattades till cirka 30 MPa vid förvarsdjup, till vilket ska adderas svälltrycket från bentoniten, för att få den totala isostatiska belastningen på kapseln. De antaganden som lett till detta värde kommer att revideras och responsen från kapseln att analyseras i ljuset av resultaten från nya beräkningar av kapselns hållfasthet med hänsyn tagen till inhomogena materialegenskaper hos den lastbärande kapselinsatsen.

### ***Maximalt möjligt permafrostdjup***

En sammanställning av tillgänglig information kring maximalt förväntat permafrostdjup under en glaciationscykel vid de två kandidatplatserna görs. Konsekvenserna av frusen återfyllning och, om så visar sig vara relevant, även frusen buffert, kommer att studeras.

Förutom detta kommer även situationen där dagens tillstånd fortgår att analyseras. Referensutgångsförhållanden som initialt defekta barriärer och torra deponeringshål ska beaktas. Flera av frågorna som nämns ovan diskuteras vidare i kapitel 3 till 6.

## 2.9.4 Exempel på probabilistiska transport- och dosberäkningar

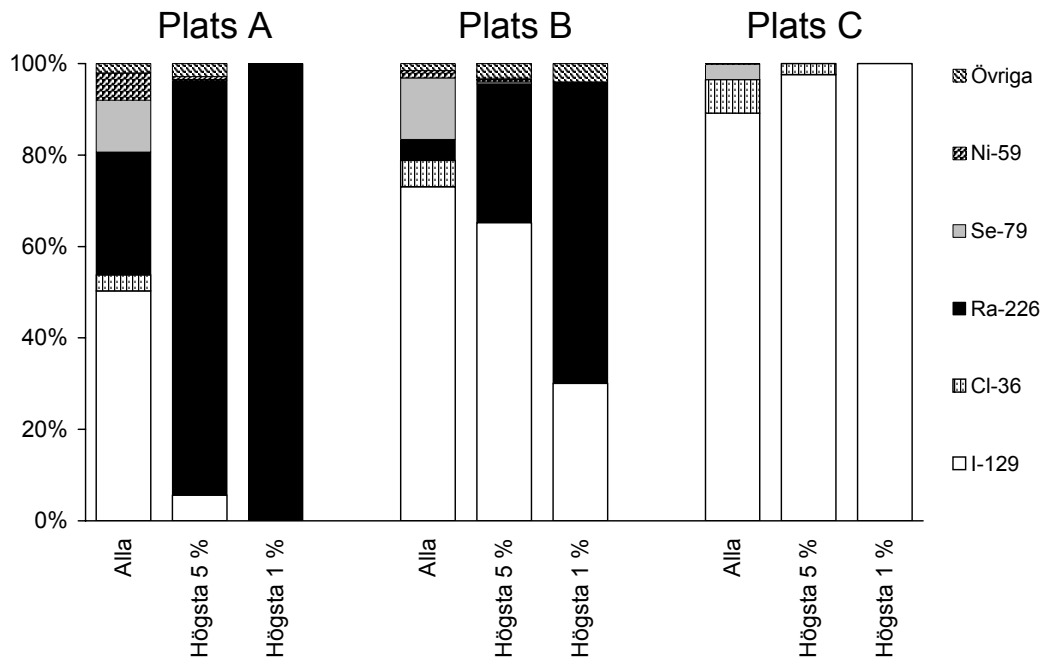
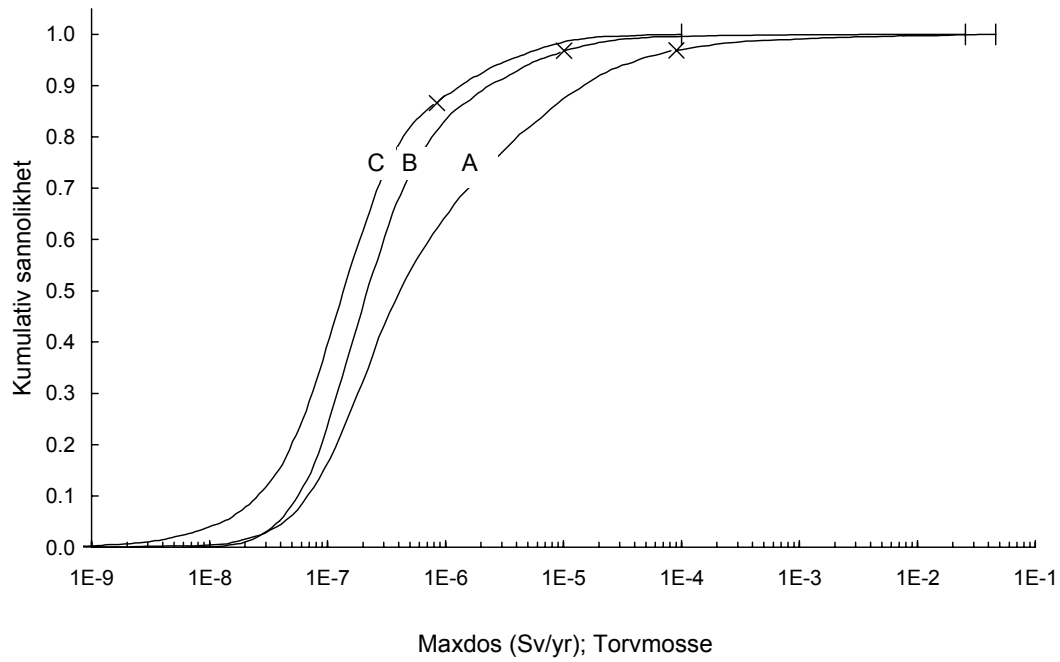
Sedan SR 97 har SKB:s kapacitet att utföra probabilistiska hydrologi-, transport- och dosberäkningar utvecklats. Detta diskuteras närmare i efterföljande kapitel. Här presenteras några resultat som erhållits med förenklade analytiska transport- och dosmodeller, med indata som utvecklats ytterligare från dem som används i SR 97. De viktigaste framstegen efter de probabilistiska beräkningar som rapporterats i SR 97 är:

- Osäkerhet med avseende på bränsleupplösningen inkluderas genom antagandet av 90 procent sannolikhet för att förhållandet är  $10^{-8}$ /år och 10 procent sannolikhet för att det är  $10^{-4}$ /år. SR 97-beräkningarna tillämpar ett konstant värde på  $10^{-8}$ /år.
- Alla fördelningar som förutsattes vara diskreta i SR 97 är nu log-normala, med bibehållna medelvärden och standardavvikelse.<sup>1</sup>
- Fördelningen av biosfärdoskonverteringsfaktorer tas direkt som utgångsfördelning från biosfärmodelleringen, snarare än att baseras på statistik från dessa resultat. Inte bara de detaljerade fördelningarna utan även korrelationerna mellan konverteringsfaktorer för olika radionuklider propageras på detta sätt till den integrerade modelleringen.
- 17 radionuklider modelleras i stället för 9 i de probabilistiska beräkningarna i SR 97 och flera variabler som getts pessimistiska konstanta värden i SR 97 behandlas nu probabilistiskt, baserat på indatabasen i SR 97.
- Antalet initiala kapselbrott är en binomialfördelning med medelvärde  $10^{-3} \cdot N_{Can}$  där  $N_{Can}$  är antal kapslar i förvaret och  $10^{-3}$  är den maximala sannolikheten för att en defekt kapsel lämnar inkapslingsanläggningen enligt konstruktionskraven.

Dessa och andra förändringar av SR 97-beräkningarna är resultat av pågående arbete för att förbättra grunden för probabilistiska dosuppskattningar i kommande säkerhetsanalyser. En viktig faktor som ännu inte ingår i detta exempel är den rumsliga fördelningen av utsläppspunkter i biosfären. I modelleringen ovan antas alla utsläpp pessimistiskt ske till samma punkt i rummet – i detta specifika fall i en liten torvmosse – vilket ger höga koncentrationer av framför allt Ra-226. Detta är en pessimistisk behandling av utsläppspunkter som skulle kunna påverka resultaten betydligt. Pågående arbete för att förbättra behandlingen av ytnära hydrologi kommer att tillåta bättre behandling i SR-Can. Även en mindre pessimistisk platsspecifik beskrivning av egenskaperna hos sprickor som skär deponeringshålen skulle troligen ha en betydande inverkan på resultaten.

Resultaten, i form av kumulativa maxdosfördelningar för de tre platserna som analyseras i SR 97 visas i figur 2-4. Stapeldiagrammet visar vilka radionuklider som ger viktiga bidrag till maxdoserna för hela uppsättningen realiseringar, och för de realiseringar som ger högst maxdoser.

<sup>1</sup> Detta är inte nödvändigtvis en "sannare" fördelning. Den är emellertid kontinuerlig, så att även parametervärden mellan de två som används i den diskreta fördelningen ingår. Dessutom har det visats att de båda genererar mycket likvärdiga resultat /Hedin, 2003a/.



**Figur 2-4.** Kumulativa maxdosfördelningar för de tre platserna, förutsatt en torvbiosfär. Medelvärden markeras med kryss och toppvärden av vertikala streck i den övre delfiguren. Stapeldiagrammet visar fördelningen av dominerande nuklider för hela uppsättningen realiseringar och för deluppsättningar av realiseringar som ger doser över den 95:e respektive 99:e percentilen.

## 2.9.5 Känslighetsanalyser

Känslighetsanalyser av resultat av preliminära analyser är viktiga för förståelsen av systemsäkerheten och för att fokusera arbetet i efterföljande steg av säkerhetsanalysen, särskilt valet av scenarier och av indata för olika modellberäkningar.

Målet för känslighetsanalyser är att fastställa vilka osäkra faktor som har betydande inverkan på säkerheten. Både resultaten med avseende på isoleringskapaciteten och fördröjningskapaciteten hos systemet kommer att bli föremål för känslighetsanalyser.

En första uppgift för en känslighetsanalys är att fastställa säkerhetsrelaterade beräkningsmål för vilka känsligheten för indata kommer att fastställas. Den mest uppenbara beräkningsmålet är årsdosen till en individ i närheten av förvaret, den primära storheten för lagstiftaren. Det finns emellertid flera andra tänkbara säkerhetsrelaterade utsläppskriterier, t ex totalt utsläpp av  $\alpha$ -emitterare och  $\beta$ -emitterare från geosfären, se vidare i avsnitt 2.12.3.

### **Systemutveckling**

För förståelsen för systemutvecklingen är det även intressant att studera känsligheten för flera mellanliggande säkerhetsmått. Bland sådana säkerhetsrelaterade tidsberoende egenskaper kan nämnas:

- kapselintegritet (korrosion, mekanisk påverkan),
- kapselns maxtemperatur,
- buffertdensitet,
- buffertsvälltryck,
- återfyllningens hydrauliska konduktivitet.

Dessa är exempel på faktorer för vilka känsligheten för osäkerheter i indata skulle kunna studeras för att ge information till efterföljande steg i analysen.

Dessa aspekter av systemet har inte behandlats med systematiska känslighetsanalyser i tidigare bedömningar. Metoder för att göra detta måste väljas efter hand som projektet framskrider. Noteras bör att en primär fråga i studien av utvecklingen är kapselintegriteten för vilken resultatet av ett specifikt beräkningsfall är att den antingen upprätthålls eller inte (och om inte, när detta inträffar). I många fall kommer troligen slutsatsen att dras att kapselintegriteten upprätthålls med varje rimlig uppsättning indataparametrar (t ex korrosionsstudier) och i sådana fall kommer resultaten av känslighetsanalyser att vara att beräkningsresultatet inte är känsligt för uppskattade osäkerheter i relevanta indata. Detta kan även vara resultatet för andra beräkningsresultat, som toppkapseltemperatur, och buffertsvälltryck.

### **Transport- och dosberäkningar**

Som nämnts ovan utgör den totala radiologiska dosen det primära säkerhetsrelaterade tidsberoende modellresultatet för vilket känslighetsanalyser utförs. Inte bara totaldosen, utan även doser från vissa individuella radionuklider är av intresse för känslighetsanalyser. Eftersom beräknade doser är starkt beroende av många höggradigt osäkra omständigheter i biosfären, är det motiverat att även genomföra känslighetsanalyser på en eller flera alternativa säkerhetsindikatorer. På försök kommer radionuklidutsläpp från geosfären att användas som en alternativ säkerhetsindikator.



Ett första mål för känslighetsanalyser är att fastställa vilka osäkra ingångsparametrar som ger det största bidraget till utgångsfördelningens bredd. Det är även relevant att fastställa vilka osäkerheter som har betydande inverkan på medelvärdet för utgångsstorheten. Detta gäller i synnerhet för dosindikatorn eftersom medeldosen är direkt proportionell mot risken, dvs acceptanskriteriet enligt svensk lag.

Det finns en rad utvecklade metoder för denna typ av känslighetsanalys, och lämpliga metoder för KBS-3-systemet har valts i nyligen genomförda arbeten /Hedin, 2002b, 2003a/, där även exempeltillämpningar med SR 97-data ges.

Flera studier och granskningar har visat att standardiserad rankregression är en lämplig metod för känslighetsanalys av icke linjära system där beräkningsresultatet är en monoton funktion av ingångsvariablerna. Detta gäller även dessa icke linjära och monotona system /Hedin, 2003a/, och den standardiserade rankregressionskoefficienten (SRRC) är därmed lämplig för att identifiera de viktigaste variablerna som bidrar till dososäkerhet.

Denna metod har tillämpats på resultaten av de probabilistiska beräkningar som beskrivs i avsnitt 2.9.4. SRRC fastställdes genom stegvis regression, se figur 2-5a. Dominerande variabler är bränsleupplösningshastigheten, FuelRate (år<sup>-1</sup>), grundvattnets advektiva transporttid,  $t_w$  (år), antalet initialt defekta kapslar,  $N_{can}$  (-), flödesvätta ytor i sprickor,  $a_w$  (m<sup>-1</sup>), diffusiviteten för Ra-226 i grundvatten, DeRockRa-226 (m<sup>2</sup>/år) och ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorer, EDF (Sv/Bq) för flera nuklider. Detta ger en bra indikering på nyckelosäkerheter för systemet givet aktuella kunskap och tillgänglig information för de tre platserna. (Den flödesvätta ytan,  $a_w$ , har nu ersatts av transportresistansen i geosfären, F, som en av de viktigaste parametrarna i transportmodelleringen.)

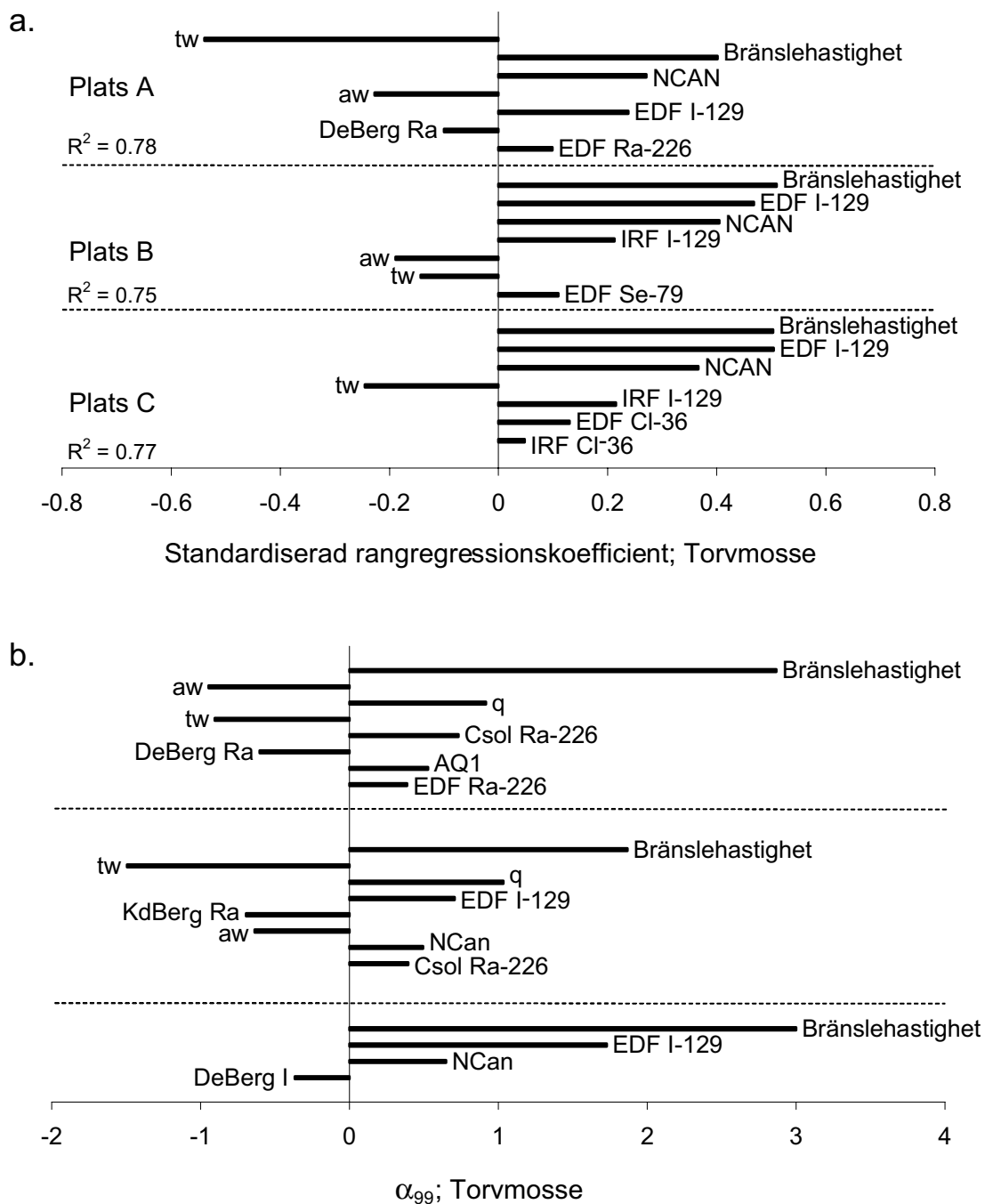
De översta få procenten av realiseringarna spelar en viktig roll i att fastställa medelvärdet och dessa realiseringar domineras av delvis andra nuklider än den kompletta fördelningen. För att fastställa vilka ingångsvariabler som avgör de höga dosresultaten valdes de fraktioner av ingångsfördelningarna som är hänförliga till den procent av realiseringarna som gav högst maxdoser för varje ingångsvariabel. Medelvärdena för dessa fraktioner kan sedan fastställas och prövas enligt

$$\alpha_{99} = \frac{\text{medelvärde}_{\text{Toppercentilfraktionen}} - \text{medelvärde}_{\text{Hela indatafördelningen}}}{\text{standardavvikelse}_{\text{Hela indatafördelningen}}}$$

Figur 2-5b visar  $\alpha_{99}$ -värdena för logaritmskt transformerade data.  $\alpha_{99}$ -värden över 0,4 betraktades som signifikanta. Ytterligare detaljer ges i /Hedin, 2002b/

### **Verifiering av resultat från känslighetsanalys**

En viktig del av varje känslighetsanalys är att verifiera att alla viktiga känsliga parametrar har identifierats. Detta kan t ex göras i) genom att tilldela konstant centralvärden till alla identifierade känsliga ingångsparametrar med bibehållande av fullständiga fördelningar för återstående indata och studera minskningen av bredden hos resultatfördelningen och ii) genom att använda fullständiga fördelningar endast för känsliga parametrar, och hålla andra konstant vid centralvärden, vilket inte bör ge någon betydande minskning av resultatbredden.



**Figur 2-5.** Resultat av känslighetsanalys för de tre platserna; a) SRRC och b)  $\alpha_{99}$ -värden. Observera att beräkningsresultatet avser maxdosen över hela analysperioden på en miljon år. Samma metod kan tillämpas på olika specificerade tidpunkter. En viktig osäker faktor som visar sig i en sådan studie är den tidpunkt vid vilken en initialt liten kapseldefekt plötsligt ökar till en större defekt på grund av utvecklingen inuti kapseln.

## **Val av data och områden för preliminära känslighetsanalyser**

Den slutliga datauppsättningen för säkerhetsanalysen kommer inte att vara tillgänglig för känslighetsanalyser som utförs som del av de preliminära analyserna. Faktum är att resultaten av dessa känslighetsanalyser är avsedda att användas för att fokusera arbetet med att fastställa den slutliga datauppsättningen. Indatafördelningar för detta första steg kommer i huvudsak att hämtas från tidigare analyser, särskilt från SR 97.

Känslighetsanalyser kommer även att genomföras på beräkningsresultat baserade på den slutliga datauppsättningen, se avsnitt 2.12.2. Det är nödvändigt att bekräfta att resultaten från dessa känslighetsanalyser är konsistent med dem som baseras på preliminära data. Detta verifierar att de preliminära analyserna var en god bas för beslut om t ex fokusering av resurser för att fastställa dataosäkerheter.

### **2.9.6 Exempel på förväntade resultat**

Förutom att ge en generell förståelse för tidsutvecklingen av djupförvarssystemet ska t ex följande specifika frågor hanteras:

- Gränssättande beräkningar av konsekvenser för kapselkorrosion vid intrång av syresatt glacialt smältvatten.
- Gränssättande uppskattningar av jordskalvseffekter, givet de konstruktionsregler som ska tillämpas.

Om redan de gränssättande beräkningarna av kapselkorrosion på grund av glacialt smältvatten indikerar att detta inte skulle äventyra isoleringspotentialen hos kapseln visar detta hur noggrant frågan behöver behandlas i de efterföljande scenarioanalyserna. Å andra sidan, om sådana beräkningar indikerar motsatsen är detta en signal om att frågan ska behandlas ingående i val och analys av scenarier.

Om gränssättande uppskattningar av jordskalvseffekter indikerar att det är osannolikt att detta fenomen leder till kapselbrott under rimliga omständigheter, förenklar detta scenariorval och -analyser. Om motsatsen skulle indikeras är detta en signal att utveckla en mer sofistikerad hantering av jordskalv i återstående delar av analysen.

### **2.9.7 Tidsskala för förvarsutveckling**

Som en del av den preliminära analysen ska en diskussion om relevanta tidsskalor för förvarsutvecklingen tas fram. I processbeskrivningarna diskuteras tidsperspektiv för varje process, se avsnitt 2.7.1. Denna information sammanställs i ett diagram som visar vilka processer och externa förhållanden som är aktiva i olika tidsskalor under analysperioden.

## **2.10 Scenarioval**

Så som diskuteras ovan är systemutvecklingen kopplad till många olika typer av osäkerheter. Det är inte möjligt att täcka in alla dessa i en enda analys av utvecklingen. Snarare studeras ett antal olika möjligheter för framtida utveckling av systemet. På den högsta nivån av denna differentiering av utvecklingsvägar ligger valet av ett antal scenarier.

### 2.10.1 Föreskrifter och allmänna råd

Flera frågor med avseende på tillämpliga föreskrifter måste beaktas i valet av scenarier. Det kvantitativa kriteriet för djupförvarets säkerhet i svenska föreskrifter är en riskgräns, och från analyser av definierade scenarier måste det alltså vara möjligt att dra slutsatser om risker.

SKI:s föreskrifter SKIFS 2002:1 kräver att scenarier användas för att beskriva framtida utveckling av förvaret. Bland dessa ska det finnas ett huvudscenario som omfattar de mest sannolika förändringarna inom förvaret och dess omgivning.

Råden som bifogas SKIFS 2002:1 beskriver tre typer av scenarier: Huvudscenariot som ingår i den förväntade utvecklingen av slutförvarssystemet, mindre sannolika scenarier, som innefattar alternativa händelseförlopp relativt huvudscenariot liksom även inverkan av tillkommande händelser samt restsценarier som utvärderar specifika händelser och förhållanden för att illustrera funktionen hos enskilda barriärer.

Enligt SKI skall huvudscenariot ”grunda sig på den troliga utvecklingen av yttre betingelser och realistiska eller, där så är motiverat, konservativa antaganden om de inre betingelserna. Det bör omfatta framtida yttre händelser som har stor sannolikhet att inträffa eller som inte kan visas ha låg sannolikhet att inträffa under den tid som säkerhetsanalysen avser. Det bör vidare bygga på i största möjliga utsträckning trovärdiga antaganden om inre betingelser, inklusive underbyggda antaganden om förekomst av tillverkningsfel och andra ofullkomligheter, och som medger en analys av slutförvarets barriärfunktioner...”

De mindre sannolika scenarierna täcker ”...varianter av huvudscenariot med alternativa händelse- och tidsförlopp samt scenarier som beaktar effekter av framtida mänsklig verksamhet såsom skador som tillfogats barriärer.”

Restscenarier bör ”... omfatta händelseförlopp och förhållanden som väljs och studeras oberoende av sannolikheter bl a för att belysa betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner. Till restsценarierna bör även höra fall för att belysa skador på människor som gör intrång i slutförvar liksom fall för att belysa konsekvenserna av ett ej förslutet slutförvar som lämnats utan övervakning.”

Vad beträffar scenariosannolikhet säger SKI:s allmänna råd följande: ”Sannolikheter för att scenarier och beräkningsfall verkligen skall inträffa bör uppskattas så långt det är möjligt för att kunna beräkna risk.”

SSI:s kommentarer till SSI FS 1998:1 anger: ”Urvalet av scenarier bör vara sådant att de tillsammans ger en allsidig bild av de risker som förknippas med slutförvaret.”

”Redovisningen skall innefatta ett fall, som utgår ifrån att de biosfärsförhållanden som råder vid tiden för ansökan om tillstånd för uppförande av slutförvaret inte förändras.” I kommentarerna anges att ”det ligger i begreppet att hänsyn också tas till kända trender såsom landhöjning...”

SSI:s riskkriterium är tillämpligt i fall av förvar som inte störs av mänskliga aktiviteter. Emellertid föreskriver SSI FS 1998:1 även att ”konsekvenserna av intrång i ett slutförvar skall rapporteras... Slutförvarets skyddsförmåga efter intrång skall beskrivas.”

## 2.10.2 Tillämpning i SR-Can

I SR 97 gjordes inget systematiskt val av scenarier som en integrerad del av projektet. I stället valdes ett antal scenarier från resultat av tidigare analyser och rapporter som tagits fram av SKB och andra. Så som konstateras både i huvudrapporten SR 97 och i granskningar av SR 97, fordras en mera integrerad och djupgående metod för scenarioval i framtida analyser.

I SR-Can skiljs scenarier från varandra genom en eller flera av följande faktorer:

- Avgörande säkerhetsrelaterade skillnader i initialtillstånd, på grund av t ex osäkerheter i platsbeskrivningsmodell eller med avseende på en viktig aspekt på initialtillståndet för en barriär. Det bör noteras att initialtillståndet innefattar hela förvaret och därmed alla kapslar och deponeringshåll.
- Avgörande säkerhetsrelaterade skillnader i randvillkor, på grund av t ex osäkerheter i klimatutveckling.
- Förekomst av säkerhetsrelaterade plötsliga händelser som i princip är omöjliga att förutsäga utifrån kunskap om systemet idag, t ex framtida mänskliga intrång eller jordskalv.

Ett lämpligt val av scenarier fordrar alltså såväl insikt i möjliga variationer i initialförhållanden och randvillkor som rimligtvis kan förväntas, som i huruvida dessa kan ha en avgörande inverkan på säkerheten. Ett annat krav är en omfattande lista över säkerhetsrelaterade händelser som behöver beaktas för att få en rimlig täckning av sådana händelser bland de valda scenarierna.

Valet av scenarier kommer att bygga på resultat från tidigare steg av analysen, framför allt innehållet i FEP-databasen, beskrivningen av initiala tillstånd och av externa förhållanden samt resultat av preliminära analyser.

Inom definitionen av varje scenario kan flera varianter definieras, i mån av behov för att täcka

- varianter av initiala tillstånd, t ex i platsbeskrivningen,
- varianter av externa förhållanden,
- konceptuella osäkerheter,
- osäkerheter i indata, även om det huvudsakliga sättet att behandla dessa kommer att vara probabilistisk utvärdering av scenarioutvecklingen.

En styrande princip i valet av scenarier är att scenarier ska vara ömsesidigt uteslutande och att de tillsammans fullständigt ska täcka in all rimligen tänkbar framtida utveckling. Ett huvudskäl för detta är att det ska vara möjligt att logiskt beräkna riskerna som är associerade till närvaron av förvaret, som en sannolikhetsviktad summa av riskbidrag från en uppsättning scenarier. Se vidare avsnitt 2.15.

Det är för tidigt att förutsäga det faktiska valet av scenarier i denna fas av planeringen av SR-Can-projektet. Förutom den principiella diskussionen ovan kan dock följande sägas redan nu med avseende på valet:

- Ett scenario med hög sannolikhet – ett ”huvudscenario” kommer att väljas i enlighet med SKI:s allmänna råd. Det är emellertid osäkert om *några* mycket sannolika scenarier kan definieras för tidsperioder långt in i framtiden, när framför allt klimatutvecklingen är synnerligen osäker.

- Flera alternativa klimatutvecklingar måste täckas i scenariovalet.
- Ett scenario där dagens biosfär inte förändras ska ingå eftersom SSI explicit kräver detta. Det återstår emellertid att fastställa vilken sannolikhet som ska åsättas ett sådant scenario.
- Jordskalv, som analyserades i ett separat scenario i SR 97, kommer troligen att integreras i det mest sannolika (och andra) scenarier i SR-Can.
- Flera ”gränssättande fall” som täcker mycket av avsikterna i SKI:s allmänna råd med avseende på ”restscenarier” kommer att analyseras. Se vidare avsnitt 2.12.1. Dessa kommer dock inte med nödvändighet att ingå i definitionen och valet av scenarier som beskrivs ovan, eftersom de inte är framtagna med samma metodik eller av samma skäl som dessa scenarier.

Scenariosannolikheter kommer att uppskattas så långt möjligt. Redan nu kan dock konstateras att dessa uppskattningar ofta kommer att behöva vara pessimistiska. Ett huvudskäl för uppskattning av sannolikheter är att tillåta en riskberäkning, se vidare avsnitt 2.15 för en diskussion om scenariosannolikhet i riskberäkningarna.

## 2.11 Kompilering av indata

Alla indata för kvantitativa aspekter i säkerhetsanalysen är behäftade med osäkerheter. Kvaliteten hos resultaten från alla beräkning i analysen beror bland annat på kvaliteten hos indata och på hur noggrant osäkerhet i indata har hanterats. Därför krävs en gemensam och metodisk filosofi för att fastställa indata och hantera osäkerhet i indata.

Uppsättningen indataparametrar för en fullständig säkerhetsanalys är mycket stor. Vissa osäkerheter i indata har avgörande inflytande på säkerhetsrelaterad resulterande osäkerhet, medan andra i princip inte alls påverkar resulterande osäkerhet. Ett uppenbart exempel på sistnämnda är transportegenskaper för sådana radionuklider som inte har någon betydande inverkan på totaldosen. Det är därför lämpligt att identifiera sådana indata som har inverkan på resultatet, och att använda dessa insikter för att fokusera arbetet att fastställa osäkerhet i indata.

Dock kräver även känslighetsanalyser indata med osäkerhetsuppskattningar och det är därför nödvändigt att gå fram stegvis, och låta en preliminär datauppsättning ligga till grund för en preliminär känslighetsanalys. Resultatet av denna analys används för att fastställa dataosäkerheter på ett noggrannare sätt, med tonvikt på de indata som har störst inverkan på slutresultatet. En preliminär indatauppsättning ska fastställas från databasen för SR 97 och andra relevanta källor.

### 2.11.1 Datainventarium

Avbildningen av säkerhetsrelevanta processer på modeller, se avsnitt 2.7, ger en uppsättning modeller som används för att kvantifiera systemets utveckling. Datakraven för dessa modeller utgör i princip det inventarium av indata som ska hanteras i säkerhetsanalysen. Vikten hos olika parametrar skiljer sig emellertid betydligt.

### 2.11.2 Procedur för tilldelning av värden

I SR 97 tillämpades en standardiserad procedur för alla indata till radionuklidtransportberäkningarna. Resultatet presenterades i datarapporten i SR 97 /Andersson, 1999/. Osäkerhetsbehandling i SR 97 diskuteras av SKI/SSI-granskning /SKI och SSI, 2001/. Myndigheterna har senare genomfört några undersökningar av expertbedömningar /t ex Wilmot och Galson, 2000; Wilmot et al, 2000; Hora och Jensen, 2002; Hora 2002/. Även SKB har bedrivit utvecklingsarbete /Hedin, 2002b, 2003a/.

En ny procedur, baserad på den som används i SR 97 och som tar hänsyn till synpunkterna i granskningen, är under utveckling. Den har formen av ett protokoll som ska användas för alla relevanta data för säkerhetsanalysen. Protokollet måste vara flexibelt, så att allt från en välmotiverad uppskattning av ett enskilt värde till en fullständig expertutredning av sannolikhetsfördelningar kan hanteras, beroende på typ av indata och säkerhetsanalysens behov. Det ska omfatta områden som t ex:

- Sammanhang – användningen av indata i SR-Can, resultat av känslighetsanalyser, korrelationer till andra indata.
- Informationskällor (experimentella data, platsundersökningsdata, modellberäkningar etc).
- Kvalitativ osäkerhetsbedömning (en beskrivning av vilka typer av osäkerheter som påverkar data).
- Kvantitativa osäkerhetsbedömning (faktisk tilldelning av t ex datavärden, dataintervall eller sannolikhetsfördelningar).

Protokollet kommer att testas innan det antas definitivt i SR-Can.

### 2.11.3 Fokusering av resurser

Känslighetsanalys är ett nyckelverktyg för fokusering av resurser för bestämning av indata, se avsnitt 2.9.5. Så som diskuteras i detta avsnitt kommer ett antal beräkningsmål med avseende på både isolering och retention att beaktas och känsligheten för dessa att fastställas.

Det är även viktigt att förstå vissa allmänna egenskaper för hur modellerna omvandlar indata till utdata. Resulterande dosfördelningar i SR 97-analysen är t ex påtagligt skeva, så som ofta är fallet i denna typ av beräkning. Skevheten beror i första hand på sättet på vilket indata behandlas av modellen. Detta har visats genom val av olika ingångsfördelningskurvor, med bibehållande av medelvärden och standardavvikelse. Skevheten i utdatafördelningen påverkas endast obetydligt av valet av indatakurvform. Resultatet är till hjälp vid bestämning av indata eftersom det informerar analytikern om att beräkningsresultaten ofta inte är känsliga för den detaljerade formen hos svansarna av indatafördelningarna. Det finns emellertid även exempel på att endast extremvärden av en indatafördelning påverkar beräkningsresultaten.

## 2.12 Analys av scenarier

Systemets utveckling kommer att modelleras för scenarier valda enligt procedurerna som beskrivs i avsnitt 2.10. Om utvecklingen innefattar kapselbrott eller om kapslar antas vara initialt skadade kommer radionuklidtransport och doskonsekvenser också att modelleras. Generellt gäller att sistnämnda kommer att modelleras för konstanta barriäregenskaper som tas fram, ofta pessimistiskt, från resultat av studier av den totala systemutvecklingen för varje scenario. Sådana barriäregenskaper är t ex buffertdensitet, kemisk sammansättning och svälltryck.

Verktygen för modellering beskrivs i processavbildningen, se tabell 2-1. Inte alla modellberäkningar kommer att faktiskt genomföras som del av scenarioanalyserna, utan kommer att referera till resultat erhållna från separata studier. Mycket av modelleringsmetoderna och verktygen beskrivs närmare i kapitel 3 till 8.

Indata och dataosäkerheter hämtas till största delen från datarapporten, se avsnitt 2.11.

Ett antal modellberäkningar kommer att göras för varje scenario. Eftersom definitionen av scenariot omfattar alla deponeringshål och alla kapslar, är det nödvändigt att täcka in hela bredden av initialförhållanden med avseende på barriärtillstånd som specificeras i initialtillståndet för ett visst scenario. Det kan därför vara nödvändigt att modellera både intakta och initialt skadade kapslar, initialt bufferttillstånd enligt specifikation och initiala bufferttillstånd som avviker från specifikationerna, ”våta” och ”torra” deponeringshål etc inom samma scenario. Detta täcks generellt av flera separata analyser som tillsammans bildar resultaten av analysen av ett visst scenario.

### 2.12.1 Gränssättande beräkningsfall

Som ett komplement till beräkningsfallen för varje scenario som diskuteras ovan genomförs ett antal gränssättande beräkningsfall för hypotetiska förhållanden. Dessa fyller flera syften: Den relativa vikten av och rollen hos olika barriärer eller säkerhetsfunktioner kan belysas. De kan bidra till att bygga upp säkerhetsargumentationen. Hypotetiskt kan en övre gräns för konsekvenserna av ett post-glacialt jordskalv ges, förutsatt att alla kapslar havererar efter 100 000 år. På liknande sätt kan konsekvenserna av ett (orealistiskt) utelämnande av en kapselskadande process ges en övre gräns. En maximal konsekvens av t ex av att ha missförstått geosfärens retentionsegenskaper skulle kunna ges genom att förutsätta att utsläpp från bufferten omedelbart når biosfären.

Dessa fall är dessutom konstruerade för att täcka de restsценарier som nämns i råden som medföljer SKI:s föreskrifter, se vidare i avsnitt 2.10.1.

Exempel på fall som skulle kunna beaktas är:

- Ingen geosfärsretention.
- Ingen löslighetsgräns inuti kapseln.
- Ingen återfyllning, ingen buffert.
- Alla kapslar havererar vid tiden  $t_1$ ,  $t_2$ , etc.
- Oförslutet förvar.

I den mån det är möjligt bör dessa fall inte bara analysera radionuklidtransport och dos utan även systemets utveckling i allmänhet.



## **Utveckling av ett konstruktionsstyrande underlag**

Det kan även vara nödvändigt att inkludera fall som bidrar till vidare utveckling av ett konstruktionsunderlag för förvaret. Råden till SKIFS 2002:1 anger: ”Med utgångspunkt i scenarier som kan visas vara särskilt viktiga från risksynpunkt bör ett antal konstruktionsstyrande fall identifieras. Dessa fall bör tillsammans med annan information, t ex om tillverkningsteknik och kontrollerbarhet, användas för att underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper.”

Detta bör otvivelaktigt vara möjligt för många barriäregenskaper, baserat på beräkningsfallen som definierats inom valda scenarier. Flera viktiga barriäregenskaper, som tjockleken hos kapselns kopparhölje eller deponeringshålets diameter, betraktas emellertid inte som öppna konstruktionsfrågor, och ingår därför inte med nödvändighet som varianter av initialtillståndet. Ytterligare beräkningsfall kan därför behövas för att utveckla det konstruktionsstyrande underlaget.

### **2.12.2 Känslighetsanalyser**

Känslighetsanalyser är en viktig del även av scenarioanalyserna. Dessutom kräver SKIFS 2002:1 en känslighetsanalys som ”visar hur osäkerheterna inverkar på beskrivningen av barriärernas utveckling och analysen av konsekvenserna för människors hälsa och för miljön”.

Känslighetsanalyser kommer därför att genomföras som en del av scenarioanalyserna. Uppgifterna och metoderna liknar dem som tillämpats i preliminära analyser, se avsnitt 2.9.5, men nu kommer analyserna att tillämpas på resultat av några av de slutliga beräkningsfallen från SR-Can-analysen.

### **2.12.3 Alternativa säkerhetsindikatorer**

Dos-/risksäkerhetsindikatorn ger ett direkt mått på konsekvenserna för människor av förvarets existens. Så som diskuterats i avsnitt 2.14.1 är flera aspekter på biosfärens utveckling synnerligen osäkra, även i ett relativt kort tidsperspektiv. Säkerhetsbedömningen kommer att baseras på ett antal antaganden i avsikt att hantera dessa osäkerheter. Därför skulle det kunna vara av intresse att komplettera dos-/riskindikatorn med alternativa indikatorer som inte kräver detaljerade antaganden om biosfären eller om mänskliga vanor.

Råden till SKIFS 2002:1 nämner att för längre tider kan dosindikatorn kompletteras med andra säkerhetsindikatorer, t ex de halter av radioaktiva ämnen från slutförvaret som kan byggas upp i mark och ytnära grundvatten eller det beräknade flödet av radioaktiva ämnen till biosfären.

Ett problem med alternativa indikatorer är att det vanligtvis inte finns något uppenbart kriterium som de beräknade storheterna kan jämföras med. I några fall kan beräkningsresultaten jämföras med naturliga koncentrationer eller flöden. Dessa kriterier är emellertid platsspecifika och inkluderar inte av människor framställda radionuklider. Sistnämnda problem kan delvis lösas genom att jämföra naturligt förekommande summakoncentrationer/-flöden av  $\alpha$ - och  $\beta$ -emitterare med motsvarande förvarsinducerade storhet.

En relaterad fråga berör kvantitativa mått på de biologiska effekterna på andra biota än människor. Detta diskuteras kortfattat i avsnitt 4.5.

## **EU SPIN-projektet**

Ett nyligen avrapporterat EU-projekt /EU, 2002/ konstaterar att två alternativa indikatorer lämpligen bör användas för att komplettera dosindikatorn. Dessa är:

- Radiotoxicitetskoncentration i biosfärvatten: att föredra på medellång sikt.
- Radiotoxicitetsflöden från geosfären: att föredra på lång sikt.

Projektet rapporterar även om referensvärden som på försök skulle kunna användas för jämförelser med beräknade koncentrationer och flöden av radionuklider från förvaret.

## **Finska aktivitetsbegränsningar**

Finska Strålsäkerhetscentralen, STUK, har nyligen utfärdat begränsningar för utsläpp av radioaktivitet till miljön /STUK, 2001/.

De nuklidspecifika begränsningarna definieras endast för långlivade radionuklider. Inverkan av deras kortlivade döttrar har beaktats i de begränsningar som anges för de långlivade modernukliderna. De nuklidspecifika utsläppsgränserna är

- 0,03 GBq/år för långlivade  $\alpha$ -emitterande isotoper av Ra, Th, Pa, Pu, Am, Cm.
- 0,1 GBq/år för Se-79, I-129, och Np-237.
- 0,3 GBq/år för C-14, Cl-36, Cs-135, och de långlivade isotoperna av U.
- 1 GBq/år för Nb-94 och Sn-126.
- 3 GBq/år för Tc-99.
- 10 GBq/år för Zr-93.
- 30 GBq/år för Ni-59.
- 100 GBq/år för Pd-107 och Sm-151.

Begränsningarna gäller för utsläpp av radioaktivitet som uppstår på grund av förväntade utvecklingsscenarier och som kan nå miljön efter flera tusen år, medan dosbegränsningarna gäller på kortare sikt. I tillämpningen av begränsningarna enligt ovan kan ett medelvärde av aktivitetsutsläpp beräknas över max 1 000 år. Summan av förhållandena mellan nuklidspecifika aktivitetsutsläpp och respektive begränsningar ska understiga ett. Noteras bör att den finländske lagstiftaren har utvecklat dessa begränsningar delvis utgående från en uppsättning referensbiosfärer som betraktas som möjliga i framtiden vid den planerade djupförvarsplatsen, Olkiluoto vid Östersjöns kust, och delvis på naturliga flöden av radionuklider som etablerats för liknande miljö. Referensvärdena i den finska ”regulatory guide” är därför inte direkt tillämpliga på andra djupförvarskoncept och platser /EU, 2002/. Emellertid är såväl djupförvarskonceptet som de platser som diskuteras i Sverige lika dem för vilka de finska aktivitetsbegränsningarna har tagits fram.

## **Övriga studier**

En SKI/SSI-studie /Miller et al, 2002/ sammanställer, utgående från publicerad litteratur, en omfattande databas av förekomster av grundämnen i naturliga material. Utgående från dessa data beräknas en serie grundämnes- och aktivitetsflöden, beroende på olika processer i olika rumsliga skalor. Slutsatsen dras att dessa flöden är jämförbara med resultat från säkerhets- och analysberäkningar.

IAEA har publicerat en studie med titeln ”Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories.” /IAEA, 1994/ och genomför för närvarande ett forskningsprogram med avseende på naturliga koncentrationer och flöden. Detta program beräknas vara avslutat under 2003.

### **Konsekvenser för SR-Can**

Materialet som presenteras ovan kommer att prövas med avseende på tillämpbarhet för svenska förhållanden och för SR-Can-analysen. Helst ska en eller två alternativa indikatorer användas i bedömningen av delar av beräkningsresultaten från SR-Can.

## **2.12.4 Användning av naturliga analogier**

### **Bakgrund**

Referenser till naturliga analogier har gjorts i SKB:s säkerhetsrapporter sedan 1978 men de har generellt sett haft begränsad roll i den övergripande säkerhetsbedömningen. Hittills har materialanalogierna haft störst framgång. Bland dessa kan nämnas uranoxid, koppar, bentonit, cement, etc, som används för att illustrera säkerhetsrelaterade processer. Processrapporten i SR 97 hänvisar till naturliga analogier för 14 av de presenterade processerna. Som exempel kan nämnas kopparkorrosion, gastransport i lera, illitisering, silikautfällning i lera, mikrobiologisk aktivitet i lera, tektonisk reaktivering eller nybildning av bergsprickor, matrisdiffusion, etc.

En översikt av analogier gavs i FUD-programmet 2001. SKI:s råd med avseende på SKIFS 2002:1 anger: ”Giltigheten av använda förutsättningar, såsom modeller och parametervärden, bör styrkas t ex genom ... fältförsök och studier av naturliga fenomen (naturliga analogier).”

### **Sammanfattning av analogier som används i processrapporten**

Processrapporten, med sina referenser till analogstudier, kommer att uppdateras i samband med SR-Can, se avsnitt 2.7.1. Det kan vara av värde även att göra en mera ”direkt” presentation av analogier, förutom deras behandling i processrapporten. Ett sätt att göra detta skulle vara att gå igenom barriärerna och sammanfatta de analoga tillämpningarna som nämns i processrapporten, på ett beskrivande och illustrativt sätt, som ett kapitel/avsnitt i huvudrapporten. Följande är en grov lista över processer, baserad på innehållet i den tidigare processrapporten:

- Använt kärnbränsle: kriticitet, bränsleupplösning.
- Kapsel: kopparkorrosion.
- Buffert och återfyllning: Gastransport, illitisering, silikautfällning, mikrobiologisk aktivitet.
- Berggrund: Reaktivering av bergsprickor, nybildning av bergsprickor, matrisdiffusion, påverkan av cement (pH-plym).

Vikt kommer automatiskt att läggas vid materialanalogier (använt kärnbränsle, koppar, bentonit), eftersom de ger nyttiga argument för säkerhetsanalysen och därför är väl representerade i processrapporten. Exemplet ovan är hämtat från processrapporten i SR 97. Den nya och uppdaterade version, som ska tas fram för SR-Can kommer troligen att innehålla ytterligare exempel.

### **Illustration av grundläggande slutsatser**

Illustrativa analogier, där text enkelt kan kombineras med bilder och diagram, kan vara till särskilt stor nytta i detta sammanhang. Ett exempel skulle kunna vara den medeltida hjälmen från York, tillverkad av stål med mässingsdekorationer, som bevarats i en gammal brunn där reducerande förhållanden har rått. Ett sådant exempel skulle kunna användas för att behandla frågan om galvanisk korrosion.

### **Att diskutera ”negativa analogier”**

Detta avsnitt skulle även kunna utgöra forum för att kommentera ”negativa analogier”, dvs analogier som indikerar vad som kan ses som motstridiga resultat relativt säkerhetsanalysens övriga slutsatser. Ett exempel är mätningen av plutoniummigration vid testplatsen i Nevada. Sådana fall bör diskuteras på en framskjuten plats i rapporten och sättas in i sitt sammanhang. I SR 97 diskuterades till exempel både de negativa kolloidanalogierna från Krunkelbach-gruvan och testplatsen i Nevada Test i den allmänna rapporten (SKB TR-99-06, vol. II., sid. 279 /SKB, 1999a/). Ett annat exempel är fenomenet Bodagrottorna som diskuteras i SKB:s FUD-program 2001 /SKB, 2001/.

## **2.13 Integrering av resultat och slutsatser**

### **2.13.1 Allmän diskussion och risksummering**

Detta steg av analysen kommer att innehålla en övergripande summering och diskussion av resultaten från analysen av de olika scenarierna. En viktig del av diskussionen kommer att vara en risksummering enligt avsnitt 2.15 för att nå en slutsats med avseende på förenlighet med föreskrifternas riskkriterium.

En annan viktig del av diskussionen av resultat är att ge återkoppling till platsundersökningar, konstruktionsutveckling och FoU-arbete. Ett generellt verktyg för detta skulle vara resultaten av känslighetsanalyser utförda som del av scenarioanalyser.

### **2.13.2 Återkoppling till platsundersökningar**

Återkoppling med avseende på platsbeskrivningen kommer i första hand att ges till platsmodelleringsgruppen som gjorde platsbeskrivningen. Gruppen kan i sin tur bedöma i vilken utsträckning denna återkoppling inverkar på de faktiska undersökningarna under fortsatt platsundersökning.

Generellt görs en bedömning av tilltron till platsbeskrivningen som helhet. Följande, mera specifika, återkoppling kan förväntas:

- Beräknade migrationsvägar kommer att ange en volym av det undersökta berget där det är särskilt viktigt med hög grad av tilltro till platsbeskrivningen. Detta skulle kunna jämföras med aktuell tilltro och skulle på så sätt leda till bedömningar av behovet att öka borrhålstätheten etc.
- På liknande sätt gäller att fördelningen av utsläppspunkterna indikerar vilka delar av markytan som är av störst intresse, åtminstone för radionuklidomsättningen vid dagens förhållanden.

- Transportberäkningar och känslighetsanalyser ger liknande återkoppling med högre precision. De bidrar även till att sätta in platsspecifika osäkerheter i ett bredare perspektiv.
- Undersökning av konsekvenserna av olika alternativ kommer att visa om det finns behov av att lägga resurser (kritiska mätningar och modellering) på att minska antalet alternativ i platsbeskrivningen, både sett till geometri och egenskaper.
- Bedömning av betydelsen av (potentiell) heterogen bergartsblandning ger återkoppling till platsundersökningar vad gäller ambitionsnivån och angreppssättet för beskrivning av variabiliteten i bergarten.
- Jordskalvsanalyser på olika alternativa beskrivningar skulle kunna ge indikeringar om hur mycket arbete som skulle fordras för att skilja mellan alternativen.
- Indikering av om kolloidnivåerna fordrar ytterligare uppmärksamhet.
- Om resultatet av säkerhetsanalysen antyder att det föreligger ett problem med indikeringar av malmförekomster kan detta kräva en noggrannare analys av förekomsternas omfattning.

Mycket av denna återkoppling ges även i de preliminära säkerhetsbedömningarna av kandidatplatserna som ska tas fram inom SR-Can-projektet. Se vidare i avsnitt 1.1.1 och /SKB, 2002/. I dessa bedömningar görs jämförelser med kriterier som ges i /Andersson et al, 2000/. Utgående från detta ges en generell rekommendation av huruvida platsundersökningarna ska fortsätta.

### **2.13.3 Återkoppling till förvarsutformning**

Med avseende på återkoppling till konstruktionsändringar/-förbättringar, ges uppenbart återkoppling genom jämförelse av resultaten från analyser av öppna designfrågor (t ex val av återfyllningsmaterial, val av buffertmaterial, TBM-borring eller sprängning) som definieras som alternativa initiala tillstånd.

Även en diskussion om konstruktionsstyrande underlag, se avsnitt 2.12.1 i ljuset av säkerhetsanalysens resultat, ska ingå i återkopplingen till förvarsutformningen.

### **2.13.4 Återkoppling till Forskning och utveckling**

Resultaten av känslighetsanalyser ger direkt återkoppling för de osäkerheter kring individuella processer eller systemegenskaper som uttryckts som dataosäkerheter.

Ett mera kvalitativt angreppssätt skulle vara att gå igenom beskrivningen av osäkerhet med avseende på den mekanistiska förståelsen och modellförenklingarna i processrapporten och efterföljande analyser av konsekvenserna av dessa osäkerheter i scenariobedömningar. Detta skulle identifiera behov av förbättrad mekanistisk förståelse och modelleringsverktyg.

### **2.13.5 Återkoppling till framtida säkerhetsanalyser**

Dessutom förväntas många erfarenheter från säkerhetsanalysprojektet i sig själv bli till nytta för planering och genomförande av framtida analyser. Dessa kommer att diskuteras som en del av återkopplingen från analysen.

## 2.14 Övergripande hantering av information/osäkerhet samt kvalitetssäkringsplan

En säkerhetsanalys hanterar stora mängder information av kvalitativ och kvantitativ natur. Hanteringen av denna informationsmassa handlar till stor del om hantering av kvalitativa och kvantitativa osäkerheter som oundvikligen hör ihop med informationen. Detta avsnitt ger en översikt av en plan för informations- och osäkerhetshantering i SR-Can. Eftersom denna fråga genomsyrar hela analysen är översikten delvis en sammanfattning av olika steg i metodiken som beskrivs i tidigare avsnitt, men med tonvikt på hanteringen av information/osäkerheter och kvalitetssäkring.

Planen utgör en utgångspunkt och kommer att utvecklas ytterligare efter hand som projektet framskrider.

Som en bakgrund ger följande avsnitt en kort beskrivning av olika typer av osäkerhet som måste hanteras i säkerhetsanalysen.

### 2.14.1 Klassificering av osäkerheter

Det finns inget entydigt sätt att klassificera osäkerheter i en säkerhetsanalys. Klassificeringen som valts nedan är emellertid enligt internationell praxis. /NEA, 1991, 1997a/ i denna typ av analyser. SKB har tidigare diskuterat klassificering och typer av osäkerheter i detalj, se t ex /SKB, 1996, avsnitt 3.4/ och /Andersson, 1999, avsnitt 2.1/ Här ges endast en kortfattad översikt, som ger ramarna för presentation av hanteringsplanen.

Säkerhetsanalysen är byggd på analys av hur ett system med ett visst initialtillstånd utvecklas på grund av inre processer och yttre påverkan/externa händelser. Från denna beskrivning kan många frågor med avseende på osäkerheter identifieras:

- Hur väl är initialtillståndet känt, kvalitativt och kvantitativt, dvs är alla viktiga aspekter på initialtillståndet identifierade och hur väl kan de beskrivas kvantitativt?
- Har alla relevanta inre processer identifierats? Hur väl förstås de mekanistiskt?
- Har alla relevanta yttre händelser och fenomen identifierats? Hur väl kan de kvantifieras?
- Hur kan en representativ redogörelse av systemets utveckling göras, med tanke på alla osäkra faktorer som nämnts ovan? Hur väl kan de inre processerna representeras matematiskt för att ge en realistisk bild av systemets utveckling? Hur väl kända är alla indata som är nödvändiga för kvantifiering av systemutvecklingen?

I sökandet efter en struktur för ett mera ingående angreppssätt på ovanstående frågor är det brukligt /NEA, 1997a/ att beskriva osäkerhet i kategorierna system-/scenariოსäkerhet, konceptuell osäkerhet och dataosäkerhet. En allmän slutsats från internationellt samarbete inom området analysmetodik är att det inte finns något entydigt eller korrekt sätt att beskriva eller klassificera osäkerhet. Tvärtom är det i varje säkerhetsanalys viktigt att göra tydliga definitioner av användningen av olika termer på detta område, i ljuset av resultaten från internationellt arbete som /NEA, 1997a/.

I SR-Can kommer följande breda definitioner att användas:

*Systemosäkerhet* gäller fullständighetsfrågor, dvs frågan om huruvida alla aspekter som är viktiga för säkerhetsbedömningen har identifierats och på vilket sätt analysen fångar de identifierade aspekterna på ett kvalitativt korrekt sätt, t ex genom valet av en lämplig uppsättning scenarier. Kort sagt, har alla faktorer, FEP, identifierats och förts in på ett tillfredsställande sätt?

*Konceptuell osäkerhet* gäller i huvudsak förståelsen av naturen hos de processer som ingår i förvarets utveckling. Detta gäller inte endast den mekanistiska förståelsen av en process eller en uppsättning kopplade processer, utan även hur väl de representeras i en förenklad matematisk modell av djupförvarets utveckling.

*Dataosäkerhet* gäller alla kvantitativa indata som används i analysen. Det finns flera aspekter att ta hänsyn till vid hanteringen av dataosäkerhet. Bland dessa kan nämnas korrelationer mellan data, distinktionen mellan osäkerhet på grund av brist på kunskap (epistemisk osäkerhet) och på grund av naturlig variabilitet (aleatorisk osäkerhet) och situationer där konceptuell osäkerhet hanteras via en vidgad uppsättning indata. Dessutom finns det många frihetsgrader för att fastställa en strategi för framtagning av indata. En möjlighet är att eftersträva pessimistiska data för att få en övre gräns i konsekvensberäkningarna. En annan möjlighet är fullständig implementering av en probabilistisk analys som kräver indata i form av sannolikhetsfördelningar. Dessa aspekter diskuteras närmare i avsnitt 2.11.

Noteras bör att distinktionen mellan systemosäkerhet och konceptuell osäkerhet är vag. Det skulle naturligtvis vara möjligt att använda endast termen konceptuell osäkerhet och i dess definition ta in den ovannämnda aspekten som betecknas systemosäkerhet.

Planen som presenteras i avsnitt 2.14.3 nedan visar hur alla diskuterade typer av osäkerhet hanteras i säkerhetsanalysen. Den är avsedd att tillämpas i detalj på bränsle, kapsel, återfyllning och delar av geosfären som ligger inom systemets avgränsningar.

## **2.14.2 Behov av stiliserade exempel**

Den lokala biosfären är definitionsmässigt en del av systemet, dvs den ligger inom systemets avgränsningar. Biosfärosäkerheter ska därför hanteras på samma sätt som andra interna delar. I biosfären är emellertid listan över processer som bestämmer systemets utveckling i princip mycket lång och systemen som de uppträder i höggradigt inhomogena, inklusive många olika ekosystem där vart och ett har många mer eller mindre komplexa komponenter. Den tidsskala på vilken biosfären förändras är dessutom generellt betydligt kortare än för andra delar av systemet, och samverkan med människor mycket starkare och associerade med delvis icke reducerbara stora osäkerheter. Även om vissa aspekter på utveckling av biosfären vid en viss plats kan prognostiseras med rimlig säkerhet i ett perspektiv på kanske 1 000 år måste en stor del av beskrivningen av framför allt mänskligt uppträdande ges i form av stiliserade exempel. Hanteringen av osäkerheter i biosfären kommer att utvecklas ytterligare under framtagningen av SR-Can.

Även då det gäller externa förhållanden måste osäkerhetshanteringen i stor utsträckning ske i form av stiliserade exempel, inriktade på att täcka möjlig framtida utveckling, t ex med avseende på klimatet. En detaljerad beskrivning av alla processerna som är involverade i klimatutvecklingen ligger utanför säkerhetsanalysens omfattning. Detta är dessutom ett forskningsområde stätt i snabb utveckling, där osäkerheterna är fundamentala och delvis icke reducerbara. Angreppssättet kommer i stället att vara att följa utvecklingen inom området och ta fram ett antal stiliserade möjliga exempel på utvecklingar, som tillsammans ger en rimlig täckning av vad som kan förväntas i framtiden. Framför allt måste extrema förhållanden med avseende på djupförvarets säkerhet fångas i dessa exempel. Bland dessa förhållanden kan nämnas

- maximal glacial belastning och resulterande hydrauliskt tryck och hydraulisk belastning på berget,
- infiltration av vatten med extrem sammansättning, som syresatt glacialt smältvatten med låg jonstyrka,

- extrema yttrandevillkor för grundvattenflöde som skulle kunna leda till stora grundvattenflöden på försvarsnivå eller grundvattenrörelser som skulle kunna orsaka infiltration av djupt liggande salthaltigt grundvatten.

De inre delarna av systemet, som svarar för säkerhetsfunktionerna isolering och fördröjning behandlas därför striktare i hanteringen av osäkerhet, medan biosfären och externa förhållanden hanteras på ett mera stiliserat sätt.

### **2.14.3 Plan för osäkerhetshantering**

Syftet med säkerhetsanalysen påverkar hanteringen av osäkerheter. I detta sammanhang är syftena med analysen i huvudsak två:

- att bedöma förenligheten med svensk lag,
- att ge återkoppling till försvarsutformning, forsknings- och utvecklingsprogram och ytterligare platsundersökningar.

Det första syftet kan, om det finns tillräcklig säkerhetsmarginal, i stort sett uppfyllas genom en pessimistisk hantering av många osäkerheter. Det andra kräver emellertid en mera sofistikerad hantering för att kvantitativt fastställa vilka osäkra faktorer och öppna designfrågor som påverkar säkerheten mest.

En plan för strukturerad och väldokumenterad hantering av osäkerheter är en viktig del av den totala kvalitetssäkringsplanen för säkerhetsanalysen. Följande är ett första försök att presentera en sådan plan för hantering av osäkerhet. Planen är grovt sett strukturerad enligt huvudstegen i säkerhetsanalysprojektet. Som nämnts ovan måste den utvecklas efter hand som SR-Can-projektet fortskrider.

#### ***Framtagning av en omfattande uppsättning interna processer och variabler***

Metod: Ta fram SR-Can-processdiagram på ett strukturerat sätt från FEP-databasen i SR-Can. SR-Can-databasen innehåller SR 97-processdiagram, SR 97-processrapport, SKB:s interaktionsmatris och NEA:s FEP-databas som i sin tur omfattar flera nationella FEP-databaser. Genom avbildning av innehållet i NEA:s FEP-databas på processerna och variablerna i SR 97-processdiagrammen, med möjlighet att införa nya processer och variabler vid behov, säkerställs att inga kända relevanta processer/variabler utesluts ur säkerhetsanalysen.

Typ av behandlad osäkerhet: Fullständighet med avseende på inre processer, variabler och kopplingar mellan process och variabler.

Dokumentation: Elektronisk version i av SR-Can-databasen (avbildning och resulterande processdiagram), rapport som beskriver arbetsprocedurer och viktigare resultat, som processdiagram.

Kvalitetssäkringsprocedurer: a) Automatisk databasprogramvara som kontrollerar att alla FEP i NEA-databasen har beaktats i avbildningen och att b) alla möjliga kombinationer av process/variabelinverkan har beaktats, c) registrering av experter och datum för beslut med avseende på alla SR-Can-databasåtgärder i databasen.



### ***Sammanställning av processrapport***

Metod: Dokumentation av varje process i processdiagrammet, enligt ett fördefinierat format. Se avsnitt 2.7.1 för en förslagen struktur. Därigenom uppnås en djupgående redovisning av dagens kunskap om påverkande och påverkade variabler i processdiagrammen, av randvillkor (i tillämpliga fall), av osäkerheter med avseende på mekanistisk förståelse, av föreslagen behandling i säkerhetsanalysen och av modellförenklingsosäkerheter i den behandlingen. Dokumentationen, tillsammans med en lista över referenser, lagras i SR-Can-databasen.

Typ av behandlad osäkerhet: Konceptuell osäkerhet med avseende på mekanistisk förståelse, modellförenklingar och uteslutning av oviktiga processer från ytterligare modellering.

Dokumentation: Processrapporten, som genereras automatiskt från SR-Can-databasen. En avbildning av processer på modeller/metoder används för att kvantifiera processen i säkerhetsanalysen, se avsnitt 2.7.1 för ett exempel.

Kvalitetssäkringsprocedurer: Genom databashantering säkerställs att alla identifierade processer är dokumenterade enligt ett fördefinierat format och att alla variabelinflenser är dokumenterade. Eventuellt bör en programvarumässig rutin i databasen utvecklas för detta ändamål. Registrering av experter och datum för beslut med avseende på alla SR-Can-databasåtgärder i databasen. Noteras bör även att en metodisk uppdatering av dokumentationen av den vetenskapliga förståelsen är nyckeln till kvalitet i processrapporten.

### ***Framtagning av en uppsättning initialtillstånd som täcker alla relevanta säkerhetsrelaterade egenskaper***

Metod: a) Samla alla FEP i NEA-databasen och FEP-databasen i SR 97 som är hänförliga till initialtillståndet. Dokumentera vidare behandling i databasen. b) Beakta relevanta öppna frågor i KBS-3-konstruktionen och andra faktorer som diskuteras i avsnitt 2.6.1. c) Välj ett antal initialtillstånd, utgående från förståelsen av säkerhetsrelaterade egenskaper. d) Säkerställ att varje variabel i processdiagrammen tilldelas ett värde i varje tillämpligt initialtillstånd, med, för viktiga indata, metoder för beskrivning av dataosäkerheter. Valet av viktiga data bygger på känslighetsanalyser.

Typ av behandlad osäkerhet: Fullständighet med avseende på valet av initialtillstånd. Dataosäkerheter i beskrivningarna av initialtillstånd.

Dokumentation: Elektronisk version i SR-Can-databasen (hantering av FEP hänförliga till initialtillstånd), databasrapport som beskriver arbetsprocedurer och viktigare resultat, som en sammanfattning av initiala FEP, rapport om initialtillstånd som beskriver valet av initialtillstånd, datarapport för relevant dataosäkerheter

Kvalitetssäkringsprocedurer: a) Automatisk databasprogramvara som kontrollerar att alla FEP i NEA-databasen och SR 97-databaserna har beaktats i avbildningen och b) registrering av experter och datum för beslut med avseende på alla SR-Can-databasåtgärder i databasen, c) väl registrerade expertbedömningar i initialtillståndsrapporten, d) procedurer för hantering av indataosäkerheter i datarapporten, se vidare avsnitt 2.11 nedan.

### ***Framtagning av externa förhållanden***

Metod: Samla in alla FEP i NEA-databasen och FEP-databasen i SR 97 som är hänförliga till externa förhållanden. Vidare behandling enligt avsnitt 2.8 och kapitel 3.

Typ av behandlad osäkerhet: Fullständighet i hanteringen av yttre händelser och faktorer i randvillkor.

Dokumentation: Elektronisk version i SR-Can-databasen (hantering av FEP hänförliga till externa förhållanden), databasrapport som beskriver arbetsprocedurer och viktigare resultat, som en sammanfattning av externa FEP.

Kvalitetssäkringsprocedurer: Automatisk databasprogramvara som kontrollerar att alla FEP i NEA- och SR 97-databaserna har beaktats i avbildningen av externa förhållanden, registrering av experter och datum för beslut med avseende på alla SR-Can-databasåtgärder i databasen.

### ***Sammanställning av indatabas***

Metod: Sammanställ indatainventariet från modeller som används i kvantitativa analyser av systemutveckling, tilldela resurser för varje indatum utgående från resultat av preliminära känslighetsanalyser, tillämpa fördefinierade protokoll i sammanställningen av information hänförlig till dataosäkerhet och kvantifiering av osäkerhet.

Typ av behandlad osäkerhet: Dataosäkerhet, konceptuell osäkerhet i fall där detta hanteras genom ett lämpligt urval av indata.

Dokumentation: Datarapporten, inklusive en redovisning av datainventariet, protokollet med instruktioner till författare och ifyllda protokoll för data som ska behandlas i rapporten.

Kvalitetssäkringsprocedurer: a) avbildning av processer på modeller så som registrerats i processdokumentationen i SR-Can-databasen, b) dokumenterad användning av protokoll för framtagning av indata i datarapporten.

### ***Val av scenarier***

Metod: Beakta resultat från beskrivningar av initialtillstånd, av processtruktur, beskrivningar av externa förhållanden och resultaten av preliminära analyser. Välj ett antal scenarier och varianter för ytterligare analys.

Typ av behandlad osäkerhet: Fullständighet i valet av utvecklingsvägar

Dokumentation: Dokumentation/rapport från scenarioval

Kvalitetssäkringsprocedurer: Dokumentera hur alla beslut har fattats, hur resultat av valet av initialtillstånd, externa förhållanden och resultatet av preliminära analyser vidarebefordras och hanteras vidare i valet av scenarier. En strukturerad process måste utvecklas för detta.

### ***Modellera utveckling för varje scenario***

Metod: Använd en relevant uppsättning modeller, beskriv osäkerheter i processrapporten, mapp processer på modeller, använd kvalitetssäkrade indata. Ta fram beräkningsfall som täcker osäkerheter, antingen probabilistiskt eller genom val av en lämplig uppsättning deterministiska fall.

Typ av behandlad osäkerhet: Integrering av mycket av osäkerheten beskrivs i tidigare steg.

Dokumentation: Processrapport, processavbildning, dokumentation av modellberäkningar.

Kvalitetssäkringsprocedurer: Dokumentation av modeller och indata med tillräcklig detaljeringsgrad så att beräkningar som är viktiga för säkerhetsanalysen kan reproduceras. En stor del av indata ska dokumenteras i SR-Can-datarapporten.

### **Gränssättande beräkningsfall**

Metod: Uteslut viktiga säkerhetsfunktioner som geosfärens retention och kapselns isoleringspotential. I övrigt, fortsatt som ovan.

Typ av behandlad osäkerhet: Bred konceptuell osäkerhet i systemförståelsen, fullständighet.

Dokumentation: Dokumentation av modellberäkningar.

Kvalitetssäkringsprocedurer: Dokumentation av modeller och indata med tillräcklig detaljeringsgrad så att beräkningarna kan reproduceras. En stor del av indata ska dokumenteras i SR-Can-datarapporten.

## **2.14.4 Sammanfattning**

Med en korrekt implementering av planen som presenteras ovan bör det vara möjligt för en granskare att

- följa och granska identifieringen av processer, variabler och beroenden mellan dessa,
- följa och granska hanteringen av inre processer, valet av initiala tillstånd och externa förhållanden och hur dessa används för val av scenarier,
- upprepa beräkningarna, särskilt de som är viktiga för säkerhetsbedömningen.

## **2.15 Metod för riskberäkningar**

### **2.15.1 Föreskrifternas krav och riktlinjer**

Det kvantitativa acceptanskriteriet i Sverige för den långsiktiga säkerheten i ett förvar för kärnavfall är en gräns för årlig risk. SSI FS 1998:1 anger följande: ”Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall skall utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst  $10^{-6}$  för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken.” Omvandlingen mellan dos och risk utförs med ICRP:s sannolikhetskoefficienter för cancer och ärftliga skador på 0,073 per Sievert. En årlig gräns på  $10^{-6}$  motsvarar alltså en dosgräns på cirka  $1,5 \cdot 10^{-5}$  Sv/år.

Doskomponenten av en risk är en integration eller summering över alla exponeringsvägar av produkten av sannolikheten för att exponeringsvägen blir verklighet och dosens storlek. Denna summa eller integral multipliceras med 0,073 per Sievert för att få fram risken, som alltså är dimensionslös.

Det är vidare viktigt att observera att SSI:s riskkriterium ”avser ett av människan ostört slutförvar” enligt SSI:s bakgrundsdokument.

### 2.15.2 Tillämpning i SR-Can

I princip ska produkten av doskonsekvenser och sannolikheterna för alla möjliga framtida utvecklingar för förvaret sammanvägas och presenteras som en tidsberoende risk. Spektrumet av möjliga utvecklingar är emellertid mycket stort och kan inte återges på ett detaljerat sätt. Detta redovisas också i SSI:s föreskrifter och tillhörande bakgrundsdokument.

Det vanliga angreppssättet i säkerhetsanalyser, och även i SR-Can, är att arbeta med scenarier och varianter som är avsedda att återspegla huvudlinjerna av ett antal representativa möjliga framtida utvecklingar. Tillsammans ska dessa ge en rimlig täckning av möjliga framtida exponeringssituationer. Villkorliga risker beräknas för varje scenario och variant och dessa sammanvägs sedan med hjälp av sannolikheten för varje scenario/variant. Varje variant, representerad av ett specifikt beräkningsfall, kan dessutom beräknas probabilistiskt för att fastställa medexponeringen, givet dataosäkerheterna för den specifika varianten.

Angreppssättet att beräkna risk som en viktad summa över ett antal scenarier begränsar det sätt på vilket scenarier väljs och definieras. Det måste vara möjligt att logiskt förklara fastställandet av sannolikheter. I korthet ska scenarierna vara ömsesidigt uteslutande, och uppsättningen av scenarier komplett i den meningen att alla relevanta framtida utvecklingar är täckta.

Ett ”normalutvecklingsscenario” med en hög sannolikhet måste t ex innehålla initialt defekta kapslar och andra barriärbrister som är sannolika då hela uppsättningen av kapslar och deponeringshål i förvaret beaktas. Vid bedömning av mindre sannolika scenarier som behandlar förstörande skadliga händelser i samband med förvarets utveckling, måste konsekvenserna av dessa överlagras på dem för det normala utvecklingsscenarioet. Detta betyder inte att beräkningsfall för sistnämnda också måste ingå i den normala utvecklingen, men det måste vara möjligt att överlagra de båda för att korrekt representera det senare scenarioet i den slutliga riskberäkningen.

Eftersom SSI:s bakgrundsdokument anger att riskkriteriet avser ett av människan ostört slutförvar, måste åtminstone scenarier som avser direkt intrång i förvaret uteslutas från risksummeringen.

### 2.15.3 Överskattning av risk

Formuleringen av scenarier, varianter och beräkningsfall, och efterföljande sammanvägning av dessa till en total risk avser inte att generera en realistisk riskberäkning. SSI:s föreskrifter kräver att den årliga risken ska vara mindre än  $10^{-6}$ . Det finns många osäkerheter som inte kan hanteras kvantitativt på något annat rigoröst sätt, då det gäller att bevisa kravuppfyllelse, än att göra pessimistiska antaganden. Ett exempel är hantering av osäkra immobiliseringsfenomen i geosfären. Dagens kunskapsbas ger inte utrymme för sådana processer i uppskattningar av säkerheten för ett förvar och de måste pessimistiskt försummas.

En annan situation där risken måste överskattas hör samman med scenariosannolikheter. För scenarier och varianter där en försvarbar sannolikhet är svår att ta fram kan ett scenario eller en variant som ger stora konsekvenser pessimistiskt tilldelas sannolikheten ett, medan andra scenarier och varianter som ger mindre doskonsekvenser kan ”inkluderas” i sådana med svårare konsekvenser.

Även om det primära syftet med riskberäkningarna är att påvisa kravuppfyllelse, finns det också en tydlig ambition att klargöra känsligheten hos beräkningsresultaten. För detta ändamål ska beräkningsfallen i princip vara så realistiska som möjligt i att återspegla

osäkerhet. Det generella kvantitativa verktyget för detta är probabilistiska bedömningar av beräkningsfall, följt av känslighetsanalyser av resultaten.

Slutsatsen kan dras att pessimistiska förenklingar ska undvikas där det finns en sund vetenskaplig bas för en kvantitativ behandling och vidare att pessimistiskt försummade egenskaper hos systemet bör ingå i en diskussion av känsligheter.

#### **2.15.4 Tidsberoende risk eller maxvärde över hela analysperioden?**

I SKB:s senaste säkerhetsanalys, SR 97, beräknades en övre gräns för maxvärdet av tidsberoende risk på följande sätt för ett visst probabilistiskt beräkningsfall: I varje realisering fastställdes dosmaximum över en analysperiod på en miljon år. Medelvärdet för den på så sätt fastställda fördelningen av maxdoser jämfördes sedan med doskriteriet. Även om detta är en korrekt metod att definiera en övre gräns för risken ger det mera information, och överensstämmer bättre med avtalskraven /SKI och SSI, 2001/ att beräkna medelårsdos vid varje tidpunkt och kräva att denna storhet aldrig överskrider dosen som motsvarar riskkriteriet  $10^{-6}$ . De båda metoderna kallas ibland på engelska "the mean of the peaks" och "the peak of the mean". I SR-Can är det alltså SKB:s avsikt att använda det sistnämnda, dvs att presentera risk som funktion av tid.

Ett exempel på de två typerna av resultat ges i figur 2-6.

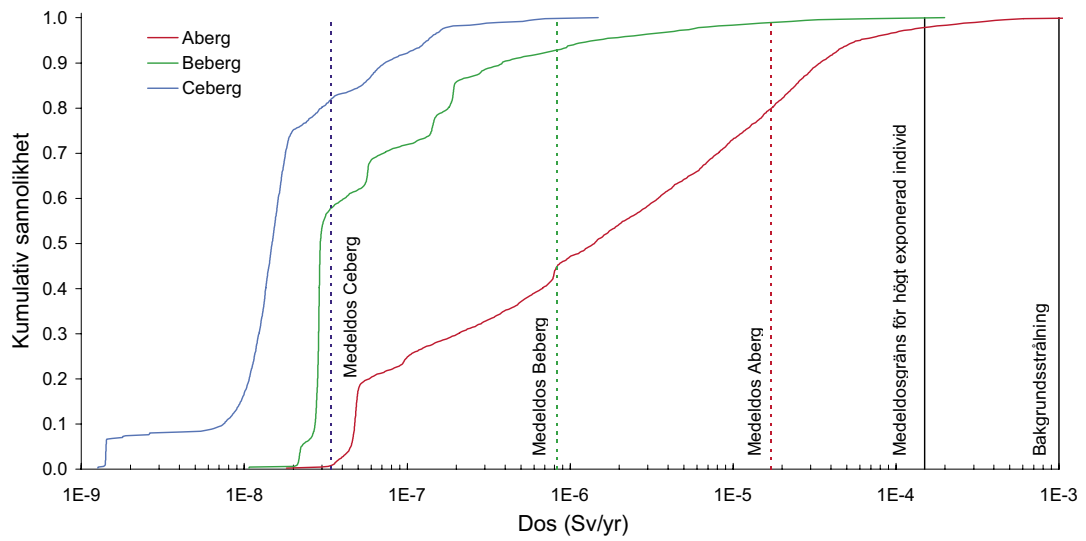
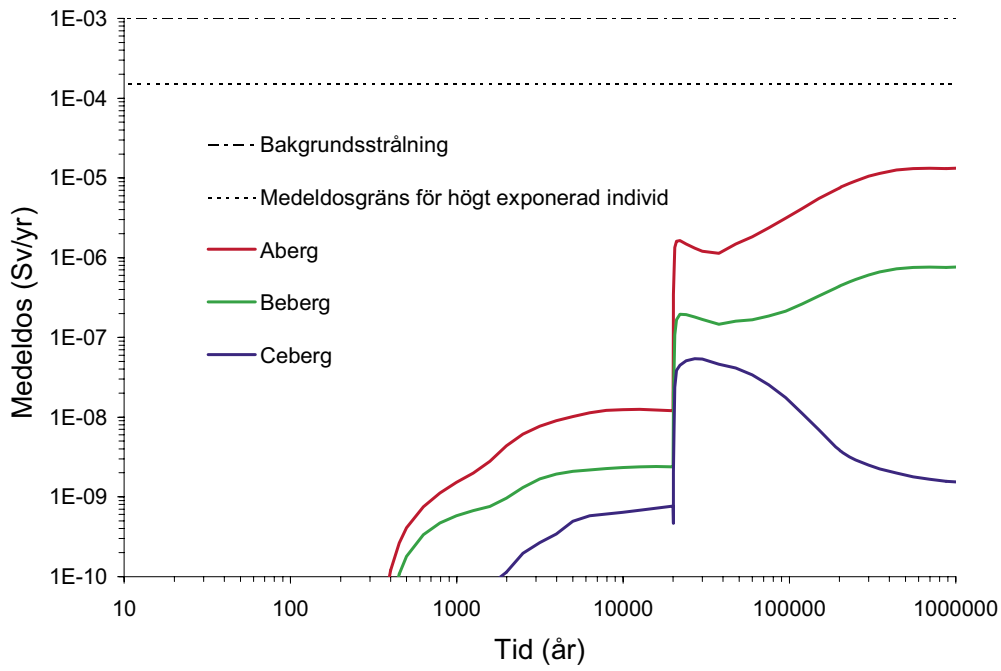
#### **2.15.5 Riskspädning**

Termen "riskspädning" används ibland för att benämna en situation där en högre grad av osäkerhet i ingångsparametrarna, dvs en bredare indatafördelning, leder till ett lägre medelvärden för en resulterande storhet t ex medeldos eller risk /NEA, 1997b/ En vid en första anblick paradoxal situation uppstår, där mindre kunskap skulle ge ett säkrare förvar om medelvärdet används som en säkerhetsindikator. Detta kan t ex vara fallet när det föreligger osäkerhet med avseende på tidpunkten för en händelse som skulle leda till kapselhaveri. Doskonsekvenserna för en given tidpunkt skulle då i hög grad bero på den antagna tidpunkt då haveriet inträffar. Ett genomsnitt över alternativa situationer i vilka kapseln havererar och maxdosen alltså uppträder vid olika tidpunkter skulle minska det resulterande medelvärdet vid varje godtycklig tidpunkt – mera ju längre tid över vilken möjliga kapselhaverier fördelas.

Denna effekt är inneboende i begreppet risk och är därmed en oundviklig konsekvens av ett riskkriterium som tillämpas som funktion av tiden och där storheten som ska fastställas är medelvärdet med hänsyn tagen till alla relevanta osäkerheter. Effekten ovan bör alltså kunna tolereras enligt svensk lag.

Icke desto mindre kan flera slutsatser för tillämpningen i säkerhetsanalysen dras av vad som nämns ovan:

- En bredare indatafördelning är inte nödvändigtvis pessimistisk, inte ens om den breddas i riktning mot svårare konsekvenser. Alltså krävs noggrannhet vid tilldelning av indatafördelningar så att indata som skulle kunna påverka beräkningsresultatet på detta sätt inte onödigtvis breddas.
- Riskspädningseffekten enligt ovan kan illustreras genom att komplettera en "peak of the mean"-beräkning med en "mean of the peaks"-beräkning, se föregående avsnitt.
- Separata beräkningar och separata diskussioner av resultaten från mera integrerade beräkningar är nödvändiga för att kunna fånga in riskspädningen.



**Figur 2-6.** Probabilistiskt beräknade medeldoser som funktion av tid för de tre platser som analyserade i SR 97 (övre). Probabilistiskt beräknad maxdosfördelning för platserna (nedre). Båda figurerna är baserade på resultatet av samma probabilistiska beräkning.

### **2.15.6 Frågor som måste klargöras**

Det finns vissa frågor med avseende på SSI FS 1998:1 som måste klargöras. SKB:s syn på dessa frågor har uttryckts i ett PM till SSI. Några exempel på frågor är

- Tidsramar för riskberäkningarna.
- Tidsberoenden och sannolikheter i biosfärmodeller.
- Avgränsningar av exponerade grupper och individer.

SSI tar för närvarande fram allmänna råd med avseende på SSI FS 1998:1, i vilka dessa frågor förhoppningsvis kan klaras ut.

## 3 Klimatfrågor

### 3.1 Inledning

Så som framhålls i avsnitt 2.8 är den framtida klimatutvecklingen en avgörande del av beskrivningen av externa förhållanden för förvarssystemet. Tidigare klimatförändringar, inklusive permafrost och glaciala förhållanden, kommer med största sannolikhet att uppträda även i framtiden. Tidssekvensen för dessa förändringar styrs av cykliska astronomiska fenomen som påverkar solinstrålningen. Även om framtida solinstrålning kan prognostiseras väl är det svårt att uppskatta motsvarande påverkan på klimatet, på grund av vår begränsade förståelse för klimatsystem och även på grund av tillkommande osäkra drivkrafter som av människan orsakade växthusfenomen.

Utgående från kunskap om tidigare klimat och av jordens klimatsystem går det att sätta gränser för möjliga variationer av det skandinaviska klimatet. De extremvärden inom vilka klimatet kan variera kan förutsägas med rimlig tilltro. Inom dessa gränser kan karakteristiska klimatförhållanden identifieras.

Varmare klimat än dagens kommer att förskjuta den aktuella gränsen mellan varma, tempererade och boreala förhållanden i nordlig riktning.

Kallare klimat påverkar flora och fauna. Lövskog ersätts av barrskog, som i sin tur ersätts av buskig tundra. I områden där årsmedeltemperaturen sjunker till under  $-1^{\circ}\text{C}$  kan permafrost börja utvecklas. Fjällglaciärer börjar växa till istäcken som så småningom kan täcka stora delar av Skandinavien. Framryckning och tillbakadragning av inlandsis ändrar strandlinjen på grund av förändringar i havsnivå och jordskorpan höjning och sänkning.

Klimatorsakade miljöförändringar som nämns ovan kan representeras som klimatdrivna processtillstånd /Boulton et al, 2001/ definierade som en klimatomfattigt definierad miljö på jordens yta där en serie processer vanligtvis uppträder tillsammans och som fortsättningsvis benämns klimattillstånd. De identifierade klimattillstånden är:

- Det glaciala tillståndet.
- Permafrosttillståndet.
- Det tempererade/boreala tillståndet.

Syftet med att identifiera klimattillstånd är att skapa relativt enkla karakteriseringar av processer som är associerade till en viss klimatomfattigt bestämd ytmiljö.

#### 3.1.1 Strategi för hantering av olika klimatförhållanden i SR-Can

Ett antal möjliga framtida klimatutvecklingsvägar kommer att beaktas i valet av scenarier. Tillsammans bör dessa olika scenarier/varianten ge en god bild av möjlig utveckling. Dessa beskrivningar kommer i huvudsak att vara av kvalitativ typ. Följande utvecklingar skulle till exempel kunna skissas i en tidsram på 100 000 år:

- en "bästa uppskattning" representerad av en karakteristisk kvartärgeologisk glaciationscykel,
- ett framtida klimat som förändrats genom mänsklig påverkan inklusive växthuseffekt,
- fortsatt samma klimat som idag.



Varje utveckling som studeras i analysen kommer sedan att beskrivas som en tidssekvens av klimattillstånd.

Klimattillstånden kommer att studeras generellt och de viktigaste frågorna för varje tillstånd kommer att behandlas. Även effekter som sträcker sig över tillståndsgränser måste hanteras. I analyser av valda scenarier/varianter kommer allmän information att sammanställas för att ge en integrerad tidsberoende bild av utvecklingen.

Nedan ges en översikt över viktiga frågor med avseende på valet av scenarier/varianter och beskrivningar av tre klimattillstånden och en plan för hantering av dessa i SR-Can.

## 3.2 Val av möjlig framtida klimatutveckling

Det är brett accepterat att under de senaste 2 miljoner åren, dvs den kvartärgeologiska perioden, har upprepade nedisningar inträffat på norra halvklotet /t ex Holmgren och Karlén, 1998; Ruddiman, 2001/. Under de senaste omkring 800 000–900 000 åren har det pågått en karakteristisk utveckling med på varandra följande perioder av kallare klimat som har gett upphov till växande istäcken, plötsligt avbrutna av en övergång till varmt klimat, liknande dagens. Dessa karakteristiska klimatcykler har haft en längd av cirka 100 000–150 000 år. Enligt den astronomiska klimatteorin, som även kallas Milankovitch-teorin, utlöses framryckning och tillbakadragning av inlandsis av variationer i solinstrålningen, i sin tur orsakad av variationerna i jordens bana kring solen /t ex Emeliani, 1955; Hays et al, 1976; Imbrie och Imbrie, 1980; Berger et al, 1980; Imbrie et al, 1984; Berger och Loutre, 1991/. Trots vissa tvetydigheter är denna teori allmänt accepterad. Som en bästa uppskattning kan förutsättas att de karakteristiska nedisningscyklerna under de senaste 800 000 åren kommer att fortsätta i framtiden. Nya upptäckter kring den astronomiska klimatteorin kommer att följas.

Närvaro av istäcken har stor betydelse, inte bara för termiska, hydrologiska, mekaniska, kemiska och biologiska randvillkor för förvaret, utan även för klimatet i sig själv. Tillväxten av inlandsis orsakas av förändringar i temperatur och nederbörd, och det växande istäcket påverkar temperatur och nederbörd. Tillväxten av istäcken orsakar också förändringar av strandlinjen på grund av att isen pressar ner jordskorpan och förändrar havets nivå. Närhet till havet påverkar också klimatet vid en given plats. Närvaro av större sjöar och hav påverkar förekomst av permafrost.

Tillväxt och avsmältning av istäcken är alltså av stor vikt för klimatförhållandena. Utbredningen av inlandsisen, givet olika klimatförhållanden och egenskaper hos istäcke och underliggande markyta, har studerats med hjälp av modellering av Boulton /Boulton och Payne, 1993; Boulton et al, 2001/. Både tidigare och framtida utbredningar av istäcken har beräknats.

Den bäst kända av tidigare istider är den senaste, weichselistiden. Användningen av en väldokumenterad inlandsismodell (datormodell), kalibrerad mot geologiska evidens för inlandsisens utbredning under weichselistiden, anses ge information om inlandsisens dynamik och egenskaper, som istjocklek, istemperatur och avsmältningshastighet. Utgående från den beräknade utvecklingen av weichselistiden kan tidigare istider simuleras. Om simulerade istäcken överensstämmer med geologiska bevis kommer de att begränsa möjliga förhållanden som inträffar under en karakteristisk kvartärgeologisk glaciationscykel /Näslund et al, 2003; Näslund och Jansson, 2003/. Våren 2004 bör en välkalibrerad och validerad simulering av weichselistiden finnas tillgänglig. Resultaten kommer att jämföras med Boultons resultat och andra simuleringar av tidigare inlandsisar som finns tillgängliga i litteraturen /t ex Berger et al, 1996/.

Inlandsismodellen som nämns ovan innehåller en modul för beräkning av jordskorpan isostatiska rörelser. Trots den förenklade jordmodell som används i denna modul ger den en tidshistorik över isostatiska rörelser under weichselistiden. De modellerade isostatiska rörelserna kan jämföras med empiriska observationer. En kompilering av empiriska data från sen weichselistid och holocen ges i Pâsses empiriska modell /Pâsse, 2001/. I kombination med kända data för havsnivåns förändring /Schackleton, 1987; Lundberg och Ford, 1994/ ger detta en bild av utvecklingen av strandnivån som kan användas för att sätta gränser för strandlinjeförskjutningens storlek och hastighet.

Tillväxt av inlandsis orsakar förändringar i jordskorpan ytmassfördelning. Jorden svarar med förändringar i relativa havsnivåer, ytdeformation, geopotential och rotationsvektor. Detta kallas glacial isostatisk anpassning (GIA – glacial isostatic adjustment). Isostatiska rörelser och havsnivåförändring måste beaktas i ett globalt perspektiv. Studier av dessa processer har utförts med hjälp av GIA-modellering. GIA-modellering kan användas för att avgränsa möjliga strandlinjeförskjutningar baserade på realistiska jordmodeller. GIA-modellering kan även bidra till utveckling av reologiska jordmodeller och förståelsen av bergsspänningsförändringar under en glaciationscykel. Möjligheten att inkludera även GIA-studier som underlag för SR-Can undersöks.

Mänsklig påverkan på klimatet är en omdebatterad fråga. /Berger och Loutre, 1997/ har med hjälp av modellering visat att utsläpp av växthusgaser kan medföra en uppvärmning av klimatet som kan störa den cyklicitet för istider som har rått under den senaste årmiljonen. Ett europeiskt projekt med syfte att utveckla strategier för att representera klimatförändringar i biosfärsystemet och att undersöka och utvärdera de potentiella konsekvenserna av klimatförändring på biosfärsystemens natur inleddes år 2000 /Calvez, 2001/. Inom detta projekt modelleras framtida klimat med samma modell som beskrivits ovan /BIOCLIM, 2001/. Modelleringen visar att växthusfenomen kan förlänga den innevarande interglaciala perioden med upp till 50 000 år. Även om dessa prognoser är höggradigt osäkra kan möjligheten av en av människan påverkad klimatutveckling inte uteslutas.

Valet av möjliga framtida klimatutvecklingar kommer att baseras på kunskap om tidigare klimatförändringar, kända från olika biologiska och geologiska lämningar (se vidare i avsnitten 3.3 och 3.4) och på resultat från modelleringsarbete. Eftersom inlandsisens utbredning är av största betydelse för klimat- och biosfärsförhållanden ger ismodelleringen en grund för beskrivning av alternativa klimatutvecklingar. Biologiska och geologiska lämningar kommer att användas för att kalibrera, validera och komplettera resultat från ismodelleringen. Relevanta publicerade resultat med avseende på klimatutveckling och -dynamik kommer att ses över. I detta sammanhang kommer arbetet inom BIOCLIM-projektet, som utförs av Loutre & Berger vid University Louvain-la-Neuve att vara en viktig källa till information. Klimatrelaterade förhållanden, händelser och processer som ingår i FEP-databasen i SR-Can kommer också att beaktas.

### **3.3 Tempererat/borealt tillstånd**

Den huvudsakliga processen som uppträder i tempererat/borealt tillstånd och som påverkar förvarets prestanda liksom biosfärsförhållanden är strandlinjeförskjutning. Ytterligare variationer i temperatur och nederbörd påverkar biosfären och salthalten i innanhavet eller sjön öster om Sverige, nuvarande Östersjön. Strandlinjeförskjutning och förändringar i salthalten kommer att ändra geohydrologiska och geokemiska förhållanden i berggrunden.

Huvudfaktorerna av vikt både för förvarets prestanda och biosfärsförhållanden är storleken och hastigheten hos strandlinjeförskjutningen och salthalten hos vattnet som omger förvaret.

Alla dessa faktorer kan gränsättas baserat på inlandsismodelleringen och empiriska studier som nämns i avsnitt 3.2.

Klimatförhållanden under holocen är kända från olika biologiska och geologiska lämningar, som årsringar på träd, pollen, havs- och sjösediment, stalagmiter och stalagtiter etc. Det finns även några lämningar från sen weichselistid. Det anses att dagens klimatvariation i nord-sydlig riktning, tillsammans med kända avvikelser under holocen ger en bild av möjliga klimatförhållanden inom tempererat/borealt tillstånd. Av människan orsakade klimatförändring anses ligga inom vidden av förändringar som förekommit under holocen. En kompilering av tillgängliga klimatdata och en på denna baserad syntes av klimatutvecklingen under holocen kommer att vara genomförd i slutet av 2003.

### **3.4 Permafrosttillstånd**

Närvaro av permafrost kommer att ändra de geohydrologiska och geokemiska förhållandena i berggrunden. Det kalla klimat som krävs för utveckling av permafrost kommer även att påverka biosfärsförhållandena. Huvudfaktorerna som påverkar förvarets prestanda är permafrostdjupet, varaktigheten hos permafrostskiktet och samt framrycknings- och tillbakadragningshastighet

Närvaro av och djup för permafrost beror i huvudsak på temperatur och närvaro av större vattenvolymer. Faktorer som snötäcke, vegetation och topografi påverkar också förekomsten av permafrost /French, 1996; Vidstrand, 2003/. Kunskapen om temperaturer i Skandinavien under en glaciationscykel är begränsad. Det finns vissa data från norra Frankrike /Guiot et al, 1989; De Beaulieu et al, 1991; Guiot et al, 1992/ som kan användas för uppskattning av temperatur och nederbörd. Dessa registrerade data kan jämföras med de drivande faktorer som används i inlandsismodelleringen, nämnd i avsnitt 3.2, för att ge en bild av möjliga temperaturvariationer. Det finns även andra klimatspår, t ex havssediment från havet öster om Norge, som kan användas för att avgränsa möjliga temperaturvariationer. Inte ens i mycket kalla klimat förekommer permafrost under större vattenvolymer. Om en plats är täckt av hav kommer det med största sannolikhet inte att förekomma permafrost. Strandlinjeförskjutningen diskuteras i avsnitt 3.2.

Modellering av utvecklingen av permafrost planeras, givet plausibla temperaturförhållanden och jordlagertjocklek och -egenskaper samt bergsegenskaper. Platsstudier vid en guldgruva i permafrostområdet i Kanada /Ruskeeniemi et al, 2002/ ger data som kan stödja antaganden och modellering.

### **3.5 Glacialt tillstånd**

Närvaro av ett istäcke påverkar termiska och mekaniska förhållanden i berget. De hydrologiska förhållandena kommer också att förändras, och som en konsekvens av detta förändras även de kemiska förhållandena i berget. Närvaro av en inlandsis påverkar naturligtvis biosfären. Huvudfaktorerna av vikt för förhållandena under markytan är isens tjocklek och bottenförhållanden. Sistnämnda avgör om det finns vätskeformigt vatten i gränssnittet mellan isen och dess underlag, vilket i sin tur påverkar mekaniska, hydrologiska och kemiska förhållanden i berget. Parametrar av vikt, förutom istjockleken, är avsmältningshastigheten, varaktigheten av isbelastningen och permafrostens djup under isen.

En framryckande eller tillbakadragande inlandsis ger upphov till föränderliga bergsspänningar. De effektiva spänningarna beror både på isbelastning och på närvaron av vattentryck. Vattentrycket under en inlandsis beror på istäckets bottenförhållanden. Om isen är bottenfrusen finns inget vätskeformigt vatten, varken i istäcket eller i gränssnittet mellan isen och dess underlag. Temperaturen understiger smältpunkten vid aktuellt tryck och det råder permafrost i underlaget. Istäcket ger upphov till en vertikal belastning, proportionell mot istjockleken, men inte till något vattentryck. Isen är frusen ner till underlaget och erosionen är liten eller obefintlig.

Om istäcket har en varm bas – dvs temperaturen i gränssnittet mellan isen och dess underlag är högre än smältpunkten vid aktuellt tryck – finns det flytande vatten mellan is och underlag. Istäcket ger upphov till såväl till en vertikal belastning proportionell mot istjockleken som till ett vattentryck med ett maximum motsvarande isens tjocklek. Isen glider längs gränssnittet mellan is och underlag, och erosionen kan bli kraftig.

Det grundläggande hydrologiska systemet inlandsis med varma bottenförhållanden består av två komponenter. Den ena får sitt vatten från den smältande bottenisen och den andra får sitt vatten från isens avsmältning vid ytan och från nederbörd. Den första komponenten uppträder överallt där temperaturen överstiger smältpunkten vid aktuellt tryck. Smältningen beror på geotermiskt värme flöde och deformationsenergi som frigörs på grund av inlandsisens inre rörelser. Smälthastigheten är låg och processen pågår utan snabba variationer över tiden. Ytsmälthastigheten kan däremot vara mycket hög och variera kraftigt under såväl dygn som år. Nära isfronten överlappar de båda hydrologiska systemen varandra.

Inlandsismodelleringen som beskrivs i avsnitt 3.2 ger en väldokumenterad glacial historik för weichselistiden. Denna historik innefattar variation av alla parametrar som är av vikt för förvarets prestanda. Den ligger till grund för känslighetstest med olika klimatologiska och geotermiska indata. Känslighetsanalyser och modellkörningar som omfattar flera nedisningscykler ger gränser för möjlig variation av viktiga parametrar. Utdata från inlandsismodelleringen ska användas som indata i analysen av termiska, mekaniska, hydrologiska och kemiska förhållanden i berget.

Det anses att den tillkommande vertikala belastningen under en nedisning undertrycker seismisk aktivitet. När isen smälter och den vertikala belastningen upphör kan en instabil situation förväntas där stora och frekventa jordskalv kan uppträda. En analys av belastningssituationen i jordskorpan och dess betydelse för seismisk aktivitet under och efter en nedisning planeras. Studien ska inledas med en känslighetsanalys som ger förståelse för parametrarna av störst vikt för postglacial sprickbildning. Analysen ska använda resultat från inlandsismodellering med avseende på istjocklek, varaktighet hos belastning och vattentryck.

Kunskaperna om hydrologi på kontinentala istäcken är begränsad. Vi saknar information om bildning av subglaciala smältvattenkanaler och tryck kring dessa, liksom av samverkan mellan de båda hydrologiska systemen som nämnts ovan. En litteraturgranskning av dagens kunskap om glacial hydrologi baserad på glaciologiska, hydrologiska, geomorfologiska och kvartärgeologiska publikationer kommer att vara avslutad i början av 2004. Hydrologin hos istäcken kommer också att belysas med hjälp av modellering och fältobservationer.

## 4 Biosfärfrågor

### 4.1 Inledning

Detta kapitel är en sammanfattning av två rapporter som behandlar metodiken för hantering av biosfärrelaterade säkerhetsanalysfrågor /Kumblad och Kautsky, 2004, i manus/ och Strategi för analys av biosfärrelaterade platsdata /Löfgren och Lindborg, 2003/.

Biosfärkapitlet diskuterar hanteringen av biosfärens allmänna utveckling, från initialtillstånd så som beskrivs av data från platsundersökningar, och framåt i olika tidsperioder. Efterföljande avsnitt handlar om hur grundvattenutsläppspunkter hanteras, varefter modellering från processförståelse diskuteras. Numeriska modelleringsmetoder och ekosystemmodeller presenteras, liksom hantering av allmänna data och hantering av exponering av människa och miljö.

I säkerhetsanalysen av SR-Can kommer flera förbättringar och ändringar att göras relativt tidigare biosfärrelaterade analyser. Erfarenheterna från säkerhetsanalysen av SFR (SAFE-projektet) är den viktigaste drivande kraften för förändringar. För SR-Can kommer inte alla viktiga biosfärdata från platsen att vara tillgängliga för säkerhetsanalysen, så som de avses vara i SR-Site. Vidare kommer data som stöder rapporter som summerar förståelsen för platsen, liksom stödjande arbetshypoteser, inte att vara klara att tas med i SR-Can för att motivera alla dataurval eller uppskattningar av osäkerheter.

Många aktörer är involverade i hanteringen av biosfären för säkerhetsanalysen. Det finns en platsundersökningsgrupp som samlar in platsspecifika data, en analysgrupp som tolkar data och bygger upp förståelse för och en biologisk modell av platsen och en säkerhetsanalysgrupp som använder den kunskap som sammanställts av analysgruppen för analyser av långsiktig utveckling av biosfären och för radionuklidtransport- och dosberäkningar. Fortsättningsvis kommer hänvisningar att ges till dessa i relevanta fall.

### 4.2 Generell biosfärutveckling

Aktuell status hos och framtida utveckling av biosfären måste beskrivas för olika tidsspann, där tilltron till beskrivningen är störst för de första 1 000 åren, medan kritiska faktorer ska identifieras för längre perioder. Avsikten är att ta fram en serie ögonblicksbilder med kartor av olika tillfällen från det förgångna till framtiden, med olika tidsupplösning och med en struktur liknande den för de rimliga biosfärer som introducerats i SAFE-projektet. Den allmänna utvecklingen av klimat som avbildats i olika scenarier som ska väljas i SR-Can kommer att fungera som underlag för beskrivningar av biosfärutveckling.

#### 4.2.1 Aktuell status

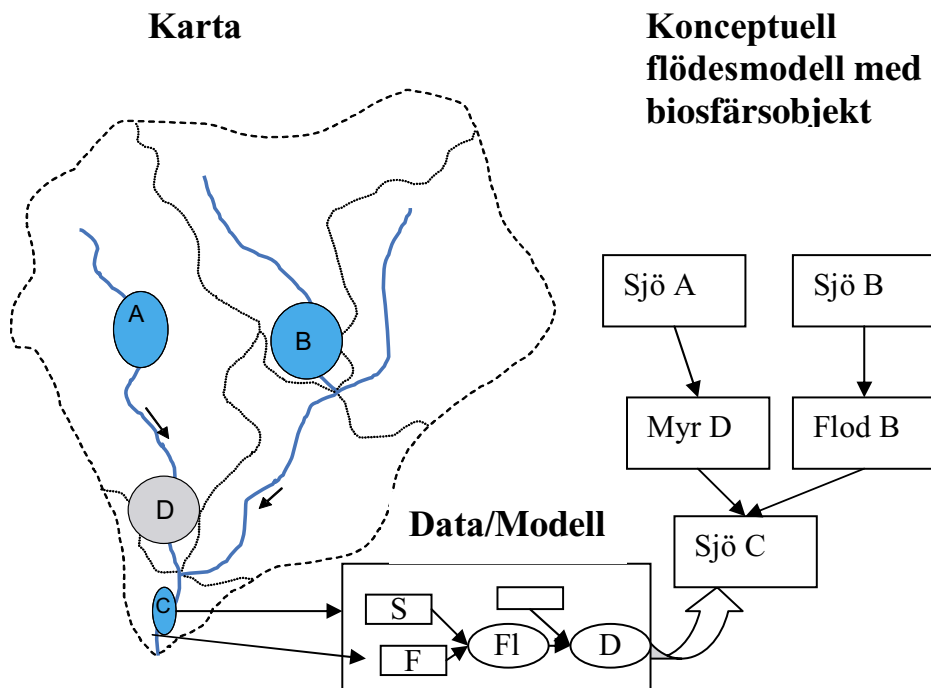
Beskrivningen av aktuell status för platsen ska inkludera uppskattningar av större vattenflöden, upplöst oorganiskt material (t ex oorganiska blandningar av näringsämnen och spårelement), upplöst och partikelformat organiskt material (t ex kol, kväve och fosfor) samt migration av organismer.

För att få en bra beskrivning av aktuell status vid platsen fordras bra platsdata. Platsdata ska användas för att ta fram kartor som beskriver strukturen/morfologi för relevanta avrinningsområden inklusive fördelning av olika typer av ämnen och parametrar för materialflöden (jfr figur 4-1 och figur 4-2).

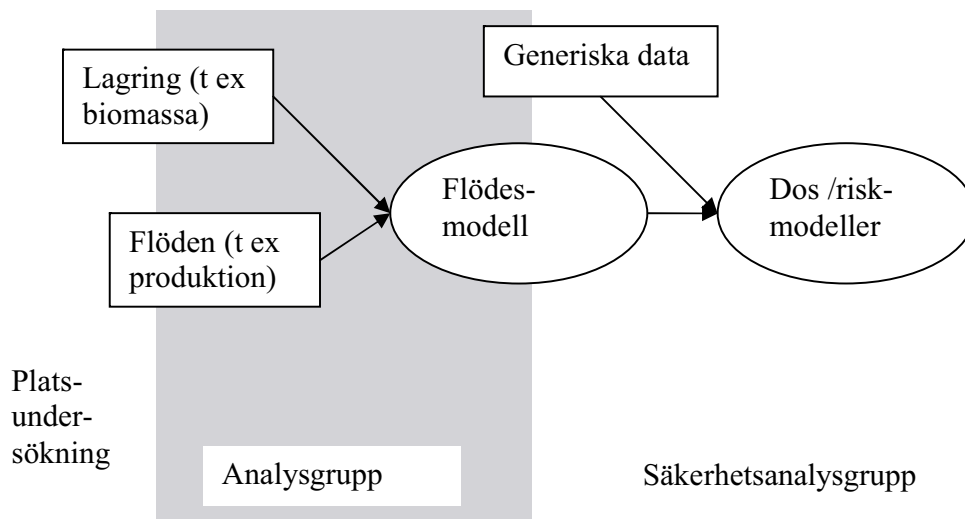
Platsdata ska beräknas som ett genomsnitt över tiden för ett år eller ett längre tidsperspektiv.

Datansamlingen ska genomföras enligt platsundersökningsprogrammet och nödvändiga data beskrivs i /Lindborg och Kautsky, 2000/. Vissa data kan behöva hämtas in från forskningsprojekt. Insamlade data från en plats måste kontrolleras mot regionala och nationella data.

Insamlade integrerade data rapporteras i kartor som beskriver aktuell status för platserna. Kartorna ska baseras på den uppmätta högupplösta topografin som tagits fram inom platsundersökningsprogrammet samt undersökning av havsbotten. Huvuddelen av arbetet utförs av analysgruppen, jfr /Lövgren och Lindborg, 2003/, men en speciell grupp kommer att arbeta med gränssnittet för datahantering mellan platsanalys- och säkerhetsanalysgrupperna (figur 4-2).



**Figur 4-1.** Biosfärmappning och konceptuella modeller. På vänster sida visas kartor som tagits fram av platsundersöknings- och analysgrupperna, indelade i utsläppsområden, sjöar och floder. Kartorna är förenklade till olika biosfärobject som används för dosmodellering. Modellen som beskriver objekten kan överföra faktormodeller eller ekosystemmodeller. Platsspecifika data för parametrar erhålls från egenskaper hos kartor integrerade över tid och rum (nedre rutan, jfr figur 4-2).



**Figur 4-2.** Schematisk biosfärmodell. Rutorna är parametrar och cirklarna modeller. Platsundersökningsgruppen mäter variablernas storlek, t ex biomassa för olika arter. Analysgruppen uppskattar flödena om de inte har mätts i fält och sammanställer en flödesmodell (t ex kol och vattenflöde) som används i säkerhetsanalysen. Denna flödesmodell förfinas av säkerhetsanalysgruppen för en exponerings- och dosmodell för radionuklider. Generella data hämtas huvudsakligen från litteraturen, men viss information kan sammanställas från platsstudier.

#### 4.2.2 De första 1 000 åren

Enligt SSI FS 1998:1 och kommentarerna från SSI avseende SR 97-analysen ska i säkerhetsanalysen utvecklingen under de första 1 000 åren betonas.

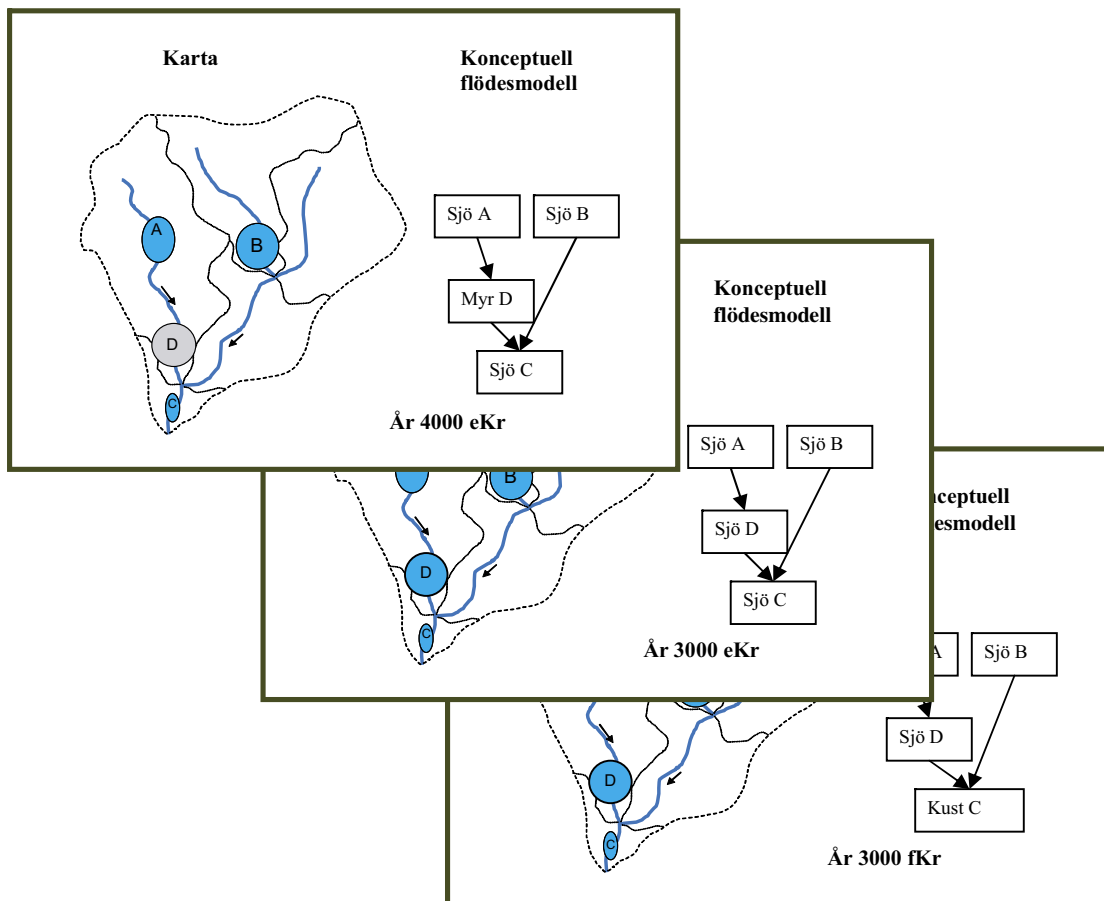
Förväntade huvuddrivkrafter under den kommande perioden om 1 000 år är strandlinjeförskjutning, biosfärsuccession (myrmarks- och skogsutveckling), sedimentomfördelning (sedimentering och återsuspension/erosion) och potentiell klimatförändring orsakad av global uppvärmning.

Framtida strandlinjeförskjutnings- och sedimenteringsprocesser härleds, som en del av säkerhetsanalysen, utgående från historisk utveckling på platsen och förståelse för framtida utveckling, se avsnitt 3.2 för sistnämnda.

Historiska data om strandlinjeförskjutnings- och sedimenteringsprocesser samlas in i platsundersökningsprogrammet och sammanställs av analysgruppen.

Framtida ekosystem, vegetation och tillhörande fauna modifieras gradvis i enlighet med strandlinjeförskjutningen. Några processer samverkar, t ex torvutveckling och skogsuccession, som även kan härledas ur befintliga data.

Utvecklingen under de första 1 000 åren kommer att beskrivas som en serie kartor, där var och en belyser en situation vid en definierad tidpunkt. Intervallen mellan kartorna beror på de olika ekosystemens förändringshastigheter. Metodiken för att etablera kartorna ska utvecklas i den första fasen av databehandlingen från Forsmark och i möjligaste mån utnyttjas för SR-Can. Emellertid kommer det att finnas dataluckor med avseende på förståelsen av regolitprocesser och regolitvegetationssamverkan. Dessa luckor kommer inte att fyllas förrän sista fasen av SR-Site (jfr figur 4-3).



**Figur 4-3.** Biosfärkartor för olika tidsperioder. Kartorna representerar olika tidsperioder med olika biosfärobject och data. En ny karta sammanställs för ett nytt tillstånd när en relevant förändring från tidigare biosfär har inträffat.

Framtida mänsklig exploatering av miljön vid platsen i form av t ex jordbruk, fiske, jakt, bär- och svamplockning uppskattas genom att förutse tillgång till lämpliga jord- och vattentyper och deras produktivitet. Kartor utvecklade för de kommande 1 000 åren ger underlag för uppskattningar av begränsningar för möjligheterna att använda områdena för olika ändamål, t ex jordbruk.

Klimatförändring eller klimatvariation på grund av växthusfenomen under de kommande 1 000 åren är svårare att kombinera med en kontinuerligt föränderlig miljö, på grund av de stora osäkerheterna kring dessa fenomen. Konsekvenserna av en potentiell klimatförändring på hydrologi och oceanografi, t ex havsnivå och salthalt, ska beskrivas. I SR-Can ska en analys av variabiliteten på grund av möjlig klimatförändring, se avsnitt 3.2, användas för att variera hydrologin och oceanografien. Eftersom forskningen fortfarande gör snabba framsteg inom detta område är det inte meningsfullt att göra större sammanställningar av resultat i SR-Can, även om så ska ske för SR-Site. Emellertid kommer metodiken för att inkorporera variabiliteten i hydrologi och oceanografi i analysen att utvecklas under första fasen av SR-Can.



### 4.2.3 Perioden fram till nästa nedisning

Under perioden bortom de första 1 000 åren och fram till nästa nedisning förväntas stor-skaliga klimatförändringar mot ett svalare klimat påverka såväl ekosystemen som strandlinjeförskjutningen. En av de större händelserna som måste beaktas för denna tidsperiod är övergången till ett tundraartat ekosystem med permafrostförhållanden. Viktiga faktorer att utvärdera är geosfär-biosfär-gränssnittet (t ex talikar), erosionsprocesser och mänsklig exploatering av miljön (t ex exponeringsvägar). Strandlinjeförskjutning orsakar dramatiska förändringar av land-hav-fördelningen och vi kan förvänta oss att dagens kustorter kommer att ligga i ”inlandet”, med förändrade utsläppspunkter. Det kan även innebära förändringar i exploateringen av ekosystem, t ex när tidigare sjöar har blivit jordbruksmark. Konsekvenserna av en eventuellt förlängd interglacial period (se avsnitt 3.2) på jordar och ekosystem måste också beaktas.

Den karakteristiska egenskapen hos denna längre tidsperiod är permafrost- och tundra-situationen. Denna situation ska beskrivas och diskuteras i en rapport. Under den första fasen av SR-Can kommer metoden för att hantera dessa förhållanden att etableras. En preliminär implementering kommer att göras för SR-Can och avslutas för SR-Site.

### 4.2.4 Istiden

Under nästa förväntade istid kommer ytans ekosystem att innehålla få arter och näringskedjor och mänsklig population torde saknas eller vara gles. Därför kommer doserna från potentiella utsläpp av radionuklider att vara ytterst små.

En rapport som beskriver islevande och isgränslevande ekosystem och mänsklig exploatering av dessa kommer att sammanställas för SR-Can för att motivera hanteringen av dosberäkningar för denna period.

### 4.2.5 Nästa interglaciala period

Den bästa prognosen av nästa interglaciala period utgår från holocen som exempel. För att uppnå detta måste egenskaperna för den historiska utvecklingen som tas fram av analysgruppen sammanjämkas med prognosen av framtida utveckling av platsen.

## 4.3 Utsläppspunkter

En avgörande informationskomponent för säkerhetsanalyser av ett djupförvar för kärnavfall är positionerna för utsläppspunkter av radionuklider i biosfären. Positionerna för sådana utsläpp fastställs av transport i geosfären, gränssnittet geosfär-biosfär, transporten i kvartär-geologiska avsättningar och ythydrologi. Andra, kanske mer ovanliga, transportvägar till biosfären är transport av radionuklider i gas- eller partikelform (t ex från borring). Därför krävs beskrivningar av hydrologiska och oceanografiska processer från förvar till slutpunkterna. Vidare är det speciella fallet med brunnar som en exponeringsväg viktigt.

### 4.3.1 Hydrologi

Hydrologin hos geosfären, ytekosystemen och gränssnittet mellan dessa ska behandlas i en säkerhetsanalys. I detta avsnitt behandlas ythydrologi inklusive oceanografi och gränssnittet mellan geosfären och ekosystemen. Geosfäraspekterna av hydrologi beskrivs i avsnitten 5.2 och 5.4.

För säkerhetsanalysen är vattenomsättningen en fundamental parameter, som vanligen drivs av förhållandet nederbörd-avdunstning (P-E) i dräneringsområdet (dvs avvattning), och vattennivåfluktuationer (främst i havet). Följaktligen är båda variablerna klimat känsliga. Avrinningen, tillsammans med vattenvolymen i sjöar och andra vattenreservoarer, bestämmer vattenomsättningstiden som är en viktig parameter i biosfärmodeller. Dessa variabler är relativt enkla att uppskatta från tillgängliga data eller data insamlade i platsundersökningsprogrammet för ythydrologi och oceanografi. Data sammanställs inom analysgruppen /Löfgren och Lindborg, 2003/.

De hydrologiska och oceanografiska variablerna sätts in i sammanhanget biosfärutveckling (t ex strandlinjeförskjutning och klimatförändring) av analysgruppen och säkerhetsanalysen.

Idag finns både regionala och platsspecifika data tillgängliga, men dessa data måste integreras för relevanta avrinningsområden. Detta kan göras i SR-Can. Emellertid kan nyinsamlade data och ny förståelse inte inkluderas före SR-Site-analysen, eftersom större delen av ythydrologin för denna plats kommer att vara tillgänglig i senare platsmodellversioner än de på vilka SR-Can baseras.

De hydrologiska processerna i regolit (jord och kvartärgeologiska avsättningar) är viktiga för att uppskatta blandningen av yttnära grundvatten och djupt grundvatten. Grundvattenflödena i kvartärgeologiska avsättningar är också viktiga för horisontell radionuklidtransport på djup där de är oåtkomliga för biota. Slutligen, eftersom utsläppspunkterna till ytekosystem förefaller vara havs- och sjöbottnar, är den vertikala transporten i kvartärgeologiska avsättningar mot dessa ekosystem liksom mot område med mycket rötter viktiga att uppskatta. Dessa frågor behandlas i avsnitt 5.2.

### **4.3.2 Brunnar**

Brunnar är en viktig exponeringsväg för människor. Användningen av brunnar beror på klimat och ythydrologi liksom på vattenkvaliteten, dvs vattnets kemiska sammansättning. Det är nödvändigt att analysera brunnsarkivet, utvärdera dess datakvalitet och tolka informationen. Det finns dessutom ett behov av att sammanställa information om rumslig fördelning av brunnar i regionen, liksom historiken för brunnsborrning och uppskattningar av framtida brunnsutveckling, dvs antalet brunnar som kan komma att borraras sett till befolkningen etc.

Dessutom behöver en modell etableras som beskriver utspädningen av radionuklider som släpps ut i brunnar. Den brunnshydrologiska modellen diskuteras närmare i avsnitt 5.2.

## **4.4 Processer och FEP**

I modelleringen av radionuklidtransport och dosberäkningar i biosfären måste många egenskaper, händelser och processer (eng. features, events, processes, FEP) behandlas. I tidigare analyser har större delen av alla identifierade viktiga biosfärprocesser och fenomen samlats in i en så kallad interaktionsmatris. Matrisen och dess dokumentation användes sedan för att motivera de använda modellerna för den kvantitativa behandlingen av processer, eller för att motivera uteslutning av mindre relevanta processer från vidare behandling.

Den senaste versionen av SKB:s biosfärinteraktionsmatris har utvecklats inom SAFE-projektet. Denna matris kommer att ses över och överföras till en processrapport där ingående FEP ska dokumenteras. Processrapporten får en struktur som påminner om

andra delar av förvarssystemet, se avsnitt 2.7. Ett första utkast till processrapport och interaktionsmatris ska färdigställas för den första fasen i SR-Can. Denna rapport kommer att kontinuerligt förbättras och uppdateras under andra fasen i SR-Can och under SR-Site.

Förväntningen är att för den största delen av processerna i biosfären behöver inga numeriska modeller utvecklas. Dokumentationen och det vetenskapliga resonemanget i processrapporten och de många rapporterna från platsen förväntas vara tillräckliga för att förenkla beräkningarna eller för att motivera att processen försummas. Denna förståelse kommer i huvudsak att utvecklas under den slutliga delen av platsundersökningen, när en tillräcklig datamängd har producerats. Därför kan de numeriska modellerna som används förändras från SR-Can till SR-Site.

## **4.5 Modellering av radionuklidtransport, doser till människor och koncentrationer i biota**

I kommande säkerhetsanalyser för djupförvar är avsikten att använda två parallella modellkedjor för modellering av radionuklidtransport och doser till människor. De två alternativen är förbättrade versioner av befintliga överföringsmodeller (som i SR 97 och SAFE) och ekosystemmodeller.

De befintliga överföringsfaktormodellerna (SR 97 och SAFE) utvecklades för sju typiska ekosystemen eller fall (myrar, sjöar, rinnande vatten, kustområden, jordbruksmark, brunnar och bevattning). I ekosystemmodelleringen kommer två modeller att användas, en akvatisk och en terrester. Den akvatiska modellen kommer att tillämpas för sjöar, vattendrag och hav, men med olika parametrar sett till habitatfördelning, vattentransport, egenskaper hos sediment och kvartärgeologisk avsättningar samt biota. På motsvarande sätt kommer den terrestra modellen att användas för skogar, våtmarker, ängsmark, jordbruksmark och andra terrestra ekosystem.

SSI FS 1998:1 anger följande: ”Biologiska effekter av joniserande strålning i berörda livsmiljöer och ekosystem ska redovisas...”

För att bedöma effekterna på miljön krävs ekosystemmodeller för att beräkna radionuklidkoncentrationer i biota. Även om ytterligare utveckling av ekosystemmodeller skulle tillåta uppskattningar av sådana koncentrationer har vi emellertid idag mycket begränsad kunskap om överföring av koncentrationer till effekter på biota, så att kvantitativa analyser av dessa kan göras. Detta konstateras även i SSI:s bakgrundsanmärkningar till SSI FS 1998:1. Ytterligare diskussion med eller råd från SSI krävs för att utveckla ett rimligt sätt att hantera frågan, med tanke på den begränsade kunskapen om inverkan av strålning på andra biota än människor. I möjligaste mån ämnar SKB utnyttja erfarenheter från EU-projekten ERICA och FASSET på detta sätt.

### **4.5.1 Rumslig modellering**

I SR-Can ska biosfären definieras i specifika biosfärobject från olika ekosystemkategorier (jfr figur 4-1). Objektet har olika rumslig utbredning och olika egenskaper som kan betraktas som ekosystem med intern omsättning. Detta innebär att istället för att beskriva t ex en sjö som 250 m gånger 250 m (som i SR 97), beskrivs sjön i sig själv som ett homogent ekosystem med en viss rumslig utsträckning och vissa ekologiska egenskaper. Strömrören som leder till sjön kommer därmed att ingå i samma ekosystem. Alltså kommer lägena för utsläppspunkterna (x, y, z) att överlagras på polygonen som beskriver biosfärobjectet.

Nästa steg är att modellera ackumuleringen av utsläpp nedströms om det finns flera strömrör som leder till samma avrinningsområde men till olika biosfärobject. Till exempel ett strömrör i skogen, ett i floden vid skogen, ett i sjön nedströms skogen och floden (figur 4-1). Detta kommer att göras genom att koppla samman de olika biosfärobjecten utgående från plats specifika kartor. Kartorna kommer inte bara att beskriva hur biosfärobjecten kopplas samman med varandra, utan utgör samtidigt uppskattningar av viktiga parametrar som vattenomsättning, ackumulerad avrinning och information om hur biosfären kan utnyttjas av människor. Eftersom antalet strömrör är begränsat i varje område är det enklare att manuellt utföra ”kopplingsarbetet” med utsläpp från varje strömrör genom biosfären. Detta kopplingsarbete ska upprepas för varje identifierad kritisk tidsperiod i biosfären (t ex rimliga biosfärer, jfr figur 4-2).

Implementeringen av idén är förhållandevis enkel men den måste testas med platsdata för att identifiera luckor i data och verktygens kapacitet. I testet kan en uppsättning högupplösta kartor med topografi från t ex en av platserna användas tillsammans med hypotetiska strömrör och förutsatta sammankopplingar. Detta ska utföras gemensamt av analys- och säkerhetsanalysgrupperna. I nästa steg ska exponeringsmodellerna kopplas till kartan (se nedan), inom ramen för säkerhetsanalysen.

#### **4.5.2 Verktyg**

De viktigaste verktygen som används för att bygga upp modeller och beräkningar beskrivs i avsnitt 8.2.4.

#### **4.5.3 Akvatiska modeller**

Akvatiska modeller används för sjöar, floder och kuster. Sjömodellen har förbättrats i SAFE. I SR-Can kommer befintliga modeller för sjöar, floder och kuster att ses över och i möjligaste mån kommer platsdata att användas för parametersättning.

Parallellt med överföringsfaktormodeller kommer ekosystemmodeller att utvecklas för samma system och i möjligaste mån användas som alternativa modeller. Emellertid kan det hända att de i slutet inte dokumenteras och valideras inom SR-Can.

#### **4.5.4 Terrestra modeller**

Terrestra modeller används för modellering av myrar, jordbruksmark, ängar och skog. I SR-Can kommer befintliga modeller för myr- och jordbruksmark att ses över och i möjligaste mån ska platsdata användas som parametrar.

För skogsmark kommer en befintlig modell att provas och väljas för bedömning. Parallellt med detta kommer ekosystemmodeller att utvecklas och i möjligaste mån användas som alternativa modeller (jfr akvatiska modeller).

Bevattningsmodellen som använts i tidigare analyser ska uppdateras med senare information som samlats in via EU-programmet BIOPROTA.

## 4.6 Allmänna data

I samtliga modeller används generiska data, t ex radionuklidens halveringstid, distributionskoefficienter som  $K_d$ -värden och upptagningskoefficienter som biokoncentrationsfaktorer (BCF). Vidare inkluderas generiska antaganden om människors uppträdande, diet och dosfaktorer i modellerna. Dessutom används flera begränsningar för organismer, hydraulisk konduktivitet, densitet etc i beräkningarna. Alla dessa data måste ses över och uppdateras, antingen från källor som ICRP eller SSI eller från platsdata som generaliseras.

### 4.6.1 Radionukliddata

Data om radionuklidens halveringstid måste ses över och användas konsekvent i analysens samtliga steg.  $K_d$ -värden ska också uppdateras och användas så konsekvent som möjligt i hela analysen. På liknande sätt ska BCF-värden och rotupptagningsfaktorer, som är viktiga för befintliga överföringsfaktormodeller uppdateras och utvärderas med avseende på sin användning på analysplatserna. Dosfaktorer för mänsklig förtäring, inandning och extern strålning behöver uppdateras i enlighet med ICRP:s rekommendationer. Detta är ett pågående arbete i BIOPROTA och ett utkast kommer att finnas tillgänglig för initialfasen av SR-Can och senare uppdateras.

Projekten FASSET och ERICA kommer förhoppningsvis att ge råd om dosfaktorer för biota.

### 4.6.2 Människor

Många mänskliga verksamheter och beteenden t ex dagligt intag av föda, måste stiliseras på grund av den stora variationen i mänskliga vanor. Emellertid kan den maximala exploateringsbasen för människor gränssättas av faktisk storlek och rådande förhållanden på platsen, uttryckt som t ex fiskproduktion och tillgängligt vatten.

Det är tämligen enkelt att beräkna storleken hos en hållbar population i ett område, utgående från data om dagens situation, existerande historiska data och ett teoretiskt maximum för hur stor population som kan överleva i en viss region.

En rapport om livsmedelsförbrukning och diet i Sverige som behandlar även den kustbefolkning som är relevant för de aktuella platserna ska tas fram för SR-Can.

## 4.7 Sannolikhetsuppskattningar för riskberäkningar

Angreppssättet för riskberäkningarna presenteras i avsnitt 2.15. För biosfären behöver sannolikheterna för olika förhållanden i viss mån uppskattas. Sådana sannolikheter kan bestämmas med t ex uppskattningar av livslängd för vissa biosfärstyper eller den statistiska representationen av nutida landskapsmönster.

För initialfasen av SR-Can kommer ett exempel att ges, baserat på data från Forsmark. Behandlingen kommer att förfinas ytterligare för den slutliga SR-Can-rapporten. Dessutom behöver frågan om sannolikhet för olika biosfärförhållanden klargöras i vidare diskussion med SSI, så som beskrivs i avsnitt 2.15.6.

## 5 Geosfärfrågor

### 5.1 Mekanikfrågor

#### 5.1.1 Inledning

Konsekvenserna av geomekaniska processer på förvarssystemet kan sträcka sig från små förändringar av hydrauliska egenskaper hos geosfären till hot mot själva kapselns integritet.

Några processer initieras på grund av brytningen av tunnelsystemet. Andra processer initieras som reaktion på deponeringen av kapslar som genererar en termisk puls. Ytterligare andra processer torde endast uppträda under mycket speciella omständigheter. Vidare gäller att många av processerna inte kan behandlas separat från andra. Många, om inte de flesta, processer är alltså kopplade.

Nedan diskuteras behandlingen av några kritiska geomekaniska processer i SR-Can. Det primära syftet är att ta fram användbara indata för planering av interimrapporten av SR-Can, som ska vara klar i juli 2004, och slutrapporten av SR-Can.

Även om geomekaniska processer skulle kunna påverka geosfärens retentionsförmåga inriktas diskussionen främst på kapselns integritet. Framför allt har skjuvkrafter längs sprickor som skär deponeringshålen potential att kraftigt förändra geometrin hos deponeringshålen, så att kapslarna kan skadas. Därför fokuserar vi här på denna specifika process och på sätt att kvantifiera i vilken omfattning den kan påverka kapselintegriteten under olika belastningsförhållanden.

Inom de ramar som skisseras ovan diskuteras följande frågor:

- Initialtillståndet.
- Termisk puls.
- Glacial belastning.
- Jordskalv.
- Tidsberoende deformationer.
- Tektoniska rörelser.
- Inverkan av mekaniska processer på berggrundens permeabilitet.
- Generella frågor.

I SR 97 räknas en kapsel i ett deponeringshål som skadad om hålet skärs av en spricka där det har skett en förskjutning på 0,1 m eller mera. Arbete pågår för att revidera detta kriterium, men det finns hittills inga indikeringar om att ändringar kommer att behövas.

#### 5.1.2 Initialtillstånd

##### **Beskrivning**

För att förstå hur olika geomekaniska processer samverkar och påverkar förvaret är det viktigt att först beskriva det initiala mekaniska tillståndet i förvarssystemet.

Initialtillståndet för spänningar definieras här som den samlade effekten av tektoniska, isostatiska och litostatiska belastningar på ett befintligt tunnelsystem, som i sig själv utövar en viss grad av spänningsomfördelning med stora tangentiella spänningar kring tunnlar och deponeringshål.

Ur mekanisk synvinkel karakteriseras initialtillståndet inte bara av bergsspänningar utan även av deformationer och förändringar i mekaniska egenskaper som har inträffat under brytning. Brytningen orsakar ett visst mått av direkta skador på bergets väggar. Stora tangentiella spänningar kan ge upphov till ytterligare sprickbildning nära väggarna. Den sammantagna effekten av direkta skador och spänningsinducerad sprickbildning resulterar i brytningssskadade zoner (EDZ – excavation damaged zones). Omfattning och karaktär hos dessa EDZ beror på det ostörda spänningstillståndet före brytning, mekaniska egenskaper hos närzonens bergart och brytningsmetoden.

Även om närzonens bergspermeabilitet påverkas, med möjlig betydelse för retentions-egenskaperna, påverkar inte de stora tangentiella spänningarna och EDZ-bildningen direkt kapselintegriteten. Emellertid utgör beskrivningen av initialtillståndet viktiga indata till olika geomekaniska analyser och modeller.

## **Plan**

Det finns flera studier som beskriver initialtillståndet för förvaret i allmän mening. Dessa studier har använts som referens för beskrivningen av initialtillstånd i SR 97. Emellertid finns inga nya studier som tar hänsyn till dagens förvarslayout och -konstruktion och som utnyttjar den betydande utvecklingen i programteknik som har skett under de senaste 5–10 åren.

Detta kan göras genom att etablera en modern närzonsbergmodell av en tunnel, med ett litet antal deponeringshål, och med konstruktion, layout, spänningstillstånd etc enligt Forsmark modell version 1.1 och andra förutsättningar för SR-Can. Det är nödvändigt att skapa en modell som är sådan att kapselavståndet är konsistent med sambandet mellan kapselavstånd, bergets termiska konduktivitet och kapseffekten. Sådana relationer kommer att finnas tillgängliga i början av hösten 2003 /Hökmark och Fälth, 2003/.

Modellerna som skapas för faktisk konstruktion kommer troligen att vara adekvata och tillräckliga som indata för SR-Can. Det betyder att modeller inte behöver skapas specifikt för säkerhetsanalysprojektet. I början av hösten 2003 kommer ett format för samordning av konstruktionsarbete med säkerhetsanalysarbete att etableras. En aspekt på samordningsarbetet är att säkerställa att modellerna, eller minst en representativ modell, kan användas för analys av efterföljande steg. För analys av termiska spänningar, spänningar inducerade av framtida belastningar etc, se ”Termisk puls” nedan.

### **5.1.3 Termisk puls**

#### **Beskrivning**

Kapseln genererar värme under lång tid, vilket ger upphov till termiska spänningar. Egenskaperna hos pulsen beror bland annat på bergets egenskaper och förvarets layout.

Den termiska pulsen ger upphov till spänningar som under ogynnsamma omständigheter orsakar glidning längs sprickor som skär deponeringshålen. Om sådana skjuvförskjutningar blir tillräckligt stora kan de äventyra kapselns integritet.

Frågan om kapselskador orsakade av termiskt inducerade sprickförskjutningar har behandlats utförligt sedan publiceringen av SR 97, /Hakami och Olofsson, 2002/. Det finns emellertid fortfarande behov av en modern termomekanisk analys av närzonsberget, med beaktande av platspecifika data och den senaste gällande konstruktionen av kapslar och tunnar. Kapseffekt, deponeringshåldiameter och kapselspridning är parametrar som kommer att ha andra värden än dem som använts i tidigare studier.

### **Plan**

Den allmänna modell (modeller) som föreslås ovan, under rubriken "initialtillstånd", ska konfigureras för att inkludera eller kompletteras av termiska analyser. Formatet för samordning av prognosarbete och säkerhetsanalysarbete kommer att tillämpas även för närzonsanalyser av termisk puls.

## **5.1.4 Glacial belastning**

### **Beskrivning**

Framtida nedisningar kommer kraftigt att påverka spänningstillståndet i och kring djupförvaret. Detta får i sin tur följande konsekvenser:

1. På samma sätt som de spänningar som orsakas av termisk puls, kan spänningarna orsakade av kvasistatisk isbelastning ge upphov till glidningsrörelser längs sprickor som skär deponeringshål.
2. Typen av glacial belastning kommer, bland andra faktorer, att styra det postglaciala spänningstillståndet och möjliga jordskalv (se nedan) som resulterar av detta.
3. Den glaciala belastningen kommer att öka spänningarna och eventuellt påverka bergets hydrauliska egenskaper. Det kan t ex uppstå ytterligare sprickbildning i berg kring deponeringshålen, som redan bär stora spänningar.

Det råder för närvarande en allmän brist på förståelse för mekanisk samverkan mellan en inlandsis, jordskorpan och manteln. Som en konsekvens av detta råder osäkerhet med avseende på de mekaniska randvillkoren för storskaliga modeller av berget som förvaret har brutits i.

### **Plan**

En studie som sätter gränser för de mekaniska belastningarna som orsakas av istillväxt, konstant isbelastning och istillbakadragning kommer att initieras enligt följande:

- Generell studie av hur enkla jordmodeller påverkas av enkla inlandsismodeller. I dessa modeller studeras variationer i lagertjocklek, elastiska och viskoelastiska parametrar, initiala tillstånd och olika stabilitetsåtgärder, först i form av 2D-modeller, sedan utvidgat till 3D-modeller. Resultat av detta arbete kan föreligga i januari 2004.
- Konstruktion av en realistisk 2D-jordmodell, en genomskärning under Nordkalotten, som innefattar topografi och varierande egenskaper hos jordskorpan och litosfären. Ett test av realistiska inlandsismodeller inklusive olika scenarier som styr variationer i portryck. Dessa verksamheter följs upp av en känslighetsanalys och validering mot empiriska spännings- och landhöjningsdata. Studierna syftar till att besvara följande nyckelfrågor: Var uppträder glacio-isostatisk sprickbildning? Krävs det deformationszoner för att modellen ska bli konsistent? Resultatet av detta arbete förväntas föreligga i juni 2004.



- Konstruktion av en 3D-modell av hela regionen, i syfte att korrekt modellera 3D-aspekterna av inlandsisens tillbakadragning. Resultatet av detta arbete förväntas föreligga i juni 2005.
- Konstruktion av en platspecifik 3D-modell som inkluderar platsens geologi. Målet är att uppskatta risken för framtida glacio-isostatisk sprickbildning vid platserna. Resultatet av detta arbete förväntas föreligga i juni 2006.

### 5.1.5 Jordskalv

#### **Beskrivning**

Jordskalv uppträder som reaktion på plötslig reaktivering (glidning) längs sprickor när bundna spänningar överskrider bergets hållfasthet. Tre, påtagligt olika, typer av jordskalv kan förutses:

1. Tektoniskt jordskalv. Dessa jordskalv uppträder på grund av den samlade effekten av spänningar till följd av kontinentaldriften och kvarstående spänningar från den senaste nedisningen.
2. Inducerade jordskalv. Dessa jordskalv orsakas av öppningar i underjorden. De kan förekomma i bergsvolymer med stora spänningar, vanligtvis på större djup än vad som planerats för förvaret, och med låg grad av sprickbildning.
3. Glacio-isostatiska jordskalv. Sådana skalv, vanligtvis benämnda "post-glaciala skalv", antas uppträda under eller strax efter avsmältning av en godtycklig framtida nedisning.

Av dessa jordskalv antas endast glacio-isostatiska jordskalv ha omedelbar relevans. Sådana jordskalv skulle kunna påverka ett djupförvar, ur geomekanisk synvinkel, på följande sätt:

- En jordbävning kan utlösas inom förvarsområdet genom reaktivering i deformationszonerna. Emellertid anses att denna effekt kan undvikas med adekvat respektavstånd till deformationszoner.
- Ett jordskalv i närheten av förvaret kan utlösa sekundär glidning längs större sprickor inom förvaret.
- Ett jordskalv kan inducera sprickor (i oskadat berg) inom förvaret.

Efter SR 97 har en uppsättning tilläggsstudier inletts, som kan användas för att uppskatta respektavstånd mellan förvarssprickor av relevant storlek (200 m diameter) och deformationszoner med potential för att ge upphov till jordskalv av olika magnituder (konsistent med deras utbredning). Angreppssättet att försöka fastställa respektavstånd kan, om det når framgång, innebära att säkerhetsanalysen inte behöver stödja sig lika tungt på prognoser av framtida seismisk aktivitet i svensk berggrund.

#### **Plan**

Det första steget av tilläggsstudierna har avslutats /Hökmark et al, 2003, under framtagning/. Resultaten har använts som utgångspunkt för nästa steg:

- FEMSOL II-studien för att hitta maximal inducerad förskjutning längs en 200 m målspricka som utsätts för ett jordskalv av magnitud 6 orsakad av ett spänningsfält av post-glacial typ.
- FLAC3D-studien, med samma allmänna syften som FEMSOL II-studien, men med tilläggsytet att hitta sätt att utöka magnitudområdet.

FLAC3D-studien är nu (juni 2003) nära att avslutas. Planeringen av följande steg kommer att genomföras under sommaren 2003. När resultaten av fortsatta analyser finns tillgängliga kommer dessa modeller att vidareutvecklas och användas för att ta fram realistiska men ändå konservativa uppskattningar av respektavstånd. Avsikten är att med numeriska metoder bekräfta att respektavstånden har de storleksordningar (dvs är korta) som konstaterats i studier från faktiska fall /Bäckblom och Munier, 2002/. Delar av detta arbete kommer att föreligga i tid för att tas med i interimrapporten av SR-Can 2004. Allt kommer att finnas klart för att tas med i slutrapporten av SR-Can 2005.

För närvarande pågår studien "Review of postglacial faulting – directions for future studies, Arvidsson", i syfte att dokumentera aktuell förståelse, eller baslinjekunskap, för dessa frågor. Uppgiften kan eventuellt hinna avslutas i tid för att tas med i interimrapporten av SR-Can.

En studie ska inledas kring möjligheterna för förvaret i sig självt att fungera som ett svaghetszon (dvs liknande en potentiell sprickzon), sådan att töjningsenergi frigörs genom glidning längs förvarets plan snarare än längs befintliga näraliggande zoner. För närvarande (juni 2003) finns inget definierat uppdrag för studien och ingen har kontrakterats att utföra den. Uppgiften ska vara slutförd i tid för slutrapporten av SR-Can 2005.

På liknande sätt ska en studie inledas för att undersöka nödvändiga förutsättningar för att bilda stora sprickor genom oskadat berg, dvs genom block som avgränsas av lokala deformationszoner. För närvarande (juni 2003) finns inget definierat uppdrag för studien och ingen har kontrakterats att utföra den. Uppgiften ska vara slutförd i tid för slutrapporten av SR-Can 2005.

Som ytterligare en möjlighet ska konturplottningstekniken som använts av /LaPointe et al, 2000/ för att presentera resultat av statiska Poly3D-beräkningar, tillämpas på en mera relevant målsprickstorlek (200 m i stället för 2000 m). Om denna metod ska provas beror på resultatet av dynamiska analyser: De preliminära resultaten antyder att statiska effekter på målsprickor tar överhanden över dynamiska effekter. Om detta visar sig stämma systematiskt kan det vara värt att överväga en ny Poly3D-studie. Beslutet bör inte fattas mycket tidigare än i oktober 2003. Uppgiften ska avslutas (om så beslutas) i tid för slutrapporten av SR-Can 2005.

### **5.1.6 Tidsberoende deformationer**

#### ***Beskrivning***

Inneboende tidsberoende materialegenskaper orsakar kryprörelser. Dessa kan medföra att deponeringshål och tunnlar konvergerar. Typen av sådana deformationer och deras eventuella inverkan på förvarets prestanda behöver undersökas ytterligare.

#### ***Plan***

En litteraturstudie om bergmasseskrypning allmänt och kryp längs sprickor i synnerhet håller på att avslutas och rapporteras /Glamheden och Hökmark, 2003/. Denna studie ger förslag avseende lämpliga sätt att sätta gränser för krypeffekter med hjälp av numeriska modeller. Litteraturstudien, inklusive förslag med avseende på faktiska numeriska studier, ska föreligga i tid för att tas med i interimrapporten av SR-Can 2004.

Resultaten av litteraturstudien ska tillämpas på diskreta sprickmodeller i närzonen under våren 2004. Uppgiften ska vara slutförd i tid för slutrapporten av SR-Can 2005.

### **5.1.7 Tektoniska rörelser**

#### ***Beskrivning***

I det långa tidsperspektivet kan belastningen på förvarsberget förändras på grund av långsam och kontinuerlig storskalig deformation av Baltiska skölden. Den horisontella kompression som orsakas av kontinentaldriften vid den tektoniska plattans västra kant antas ha bidragit till utvecklingen av dagens spänningstillstånd med huvudsakligen horisontell spänning i riktning NV-SO, och kan fortsätta i framtiden. I SR 97 gjordes uppskattningar av tektoniska kompressionseffekter. Dessa uppskattningar resulterade i mycket små belastningsförändringar. Slutsatsen som drogs i SR 97 var att risken för kapselhaveri på grund av framtida långsamma tektoniskt betingade belastningsförändringar kan försummas.

#### ***Plan***

Aktuell kunskap med avseende på framtida belastningsförändringar behöver dokumenteras för att förbättra tilltron till de uppskattningar som måste göras för att utesluta möjligheten för kapselskador. Detta ska göras i form av en litteraturstudie. Troligen behövs ingen omfattande studie, men de kommer att ta viss tid att inleda och specificera arbetet. Studien bör kunna avslutas i tid för att tas med i slutrapporten av SR-Can 2005.

### **5.1.8 Inverkan av mekaniska processer på berggrundens permeabilitet**

#### ***Beskrivning***

I SR 97 refererades till allmänna och kvalitativa synsätt på hur spänningsförändringar påverkar permeabiliteten i närzonsberget. Frågan om permeabilitetsförändringar behöver behandlas på ett mera kvantitativt sätt. Sedan publiceringen av SR 97 har arbete utförts i olika sammanhang, t ex inom DECOVALEX-projektet.

#### ***Plan***

För närvarande (juni 2003) finns ingen bild av tillämpbarheten av resultat som erhållits under utveckling och test av kopplade MH-modeller. En sådan bild måste etableras i början av hösten 2003. Utgående från bilden ska det vara möjligt att besluta om extra numeriska analyser måste genomföras för säkerhetsanalysens specifika syfte. Om detta skulle vara nödvändigt kan resultaten av dessa analyser föreligga i tid för att tas med i slutrapporten av SR-Can 2005, förutsatt att arbetet inleds snart efter att en tydlig bild av kunskapsstillståndet har etablerats.

### **5.1.9 Generella frågor**

#### ***Beskrivning***

Det finns några mycket allmänna frågor som är relevanta för de flesta belastningsfall. Med avseende på kapselintegritet behöver följande frågor beaktas:

- Relevans hos relationen mellan sprickstorlek och sprickförskjutning.
- Öppning och koalescens (sammanlänkning) av sprickor.

I SR 97 användes allmänna relationer mellan sprickstorlek och möjlig skjuvförskjutning i sprickor som stöd för numeriskt framtagna slutsatser om maximalt möjliga skjuvrörelser under olika belastningsförhållanden (glacial belastning, tektonisk belastning etc. För 2D-förhållanden kan analytiska uttryck tas fram, förutsatt att det medium som omger sprickan är linjärt elastiskt, isotropt och homogent (figur 5-1).

Relevansen hos förhållandet storlek/förflyttning behöver undersökas för realistiska förhållanden (framför allt för sprickiga material). För säkerhetsanalysen är denna fråga relevant i förhållandevis stor skala, eftersom endast större sprickor kan deformeras tillräckligt för att skada kapslar.

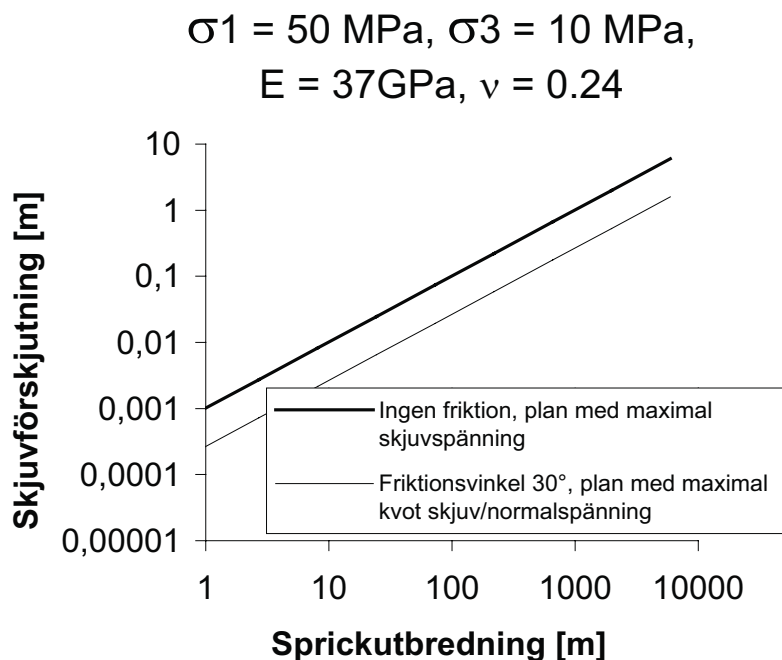
Frågan spricköppning/koalescens är relevant i alla skalor. I deponeringshålskala och tunnelskala kan sprickbildning förändra närzonens permeabilitet. Koalescens av större sprickor till ännu större sprickor kan skapa möjligheter till kapselskador.

### Plan

En studie ska inledas med följande syften:

- Undersöka hur förhållandet storlek-förskjutning påverkas om berget inte är elastiskt.
- Undersöka hur förskjutningen påverkas om en spricka med given utbredning i verkligheten är en del av ett mekaniskt sammankopplat spricksystem, så att det finns risk för att den effektiva utbredningen har underskattats.

För närvarande (juni 2003) finns ingen arbetsbeskrivning definierad för denna studie. Troligen kommer 3DEC-programmet att användas. Uppgiften ska vara slutförd i tid för slutrapporten av SR-Can 2005.



**Figur 5-1.** Förhållande mellan skjuvförskjutning och sprickutbredning för idealiserade förhållanden.

## 5.2 Flödesmodellering för aktuella klimatförhållanden

Grundvattenflödesmodellering ger vissa nyckelstorheter för efterföljande radionuklidtransportberäkningar i SKB:s modellkedja för säkerhetsanalys. Dessa storheter är:

- Grundvattenflöde (Darcy-hastighet vid förvarsdjup/representativa kapselpositioner).
- Flödesvägar från representativa kapselpositioner till biosfären.
- Transportresistans och advektiv transporttid längs flödesvägarna.

Grundvattenflödesmodellering i tidigare säkerhetsanalyser, t ex SKB 91 /SKB, 1992/ och SR 97 /SKB, 1999a/, har stött sig tungt på användningen av HYDRASTAR /Norman, 1992/, ett stokastiskt kontinuumprogram. Ett antal brister med HYDRASTAR identifierades specifikt i samband med SR 97. Bland de viktigaste kan nämnas:

- Brist på densitetsdrivet flöde.
- Begränsningar med avseende på transienta flödeslösningar.
- Massabalansproblem vid överföring av randvillkor från regionala till lokala (HYDRASTAR) skalmodeller.
- Begränsningar med avseende på transportresistans på grund av sprickor som inte är diskret beskrivna.

Bristerna ovan gav incitament till utveckling av nya verktyg. Behovet av nya verktyg ökades av det explicita önskemålet att använda samma grundvattenflödesmodellverktyg, inte bara för säkerhetsanalysändamål utan även för platsundersökningsstudier och konstruktionsfrågor inom SKB:s platsundersökningsprogram. Därför behövs mångsidiga och flexibla verktyg som kan hantera specifika frågor från olika slutanvändare.

I detta avsnitt diskuteras i första hand en situation där randvillkor och ingående processer avspeglar förväntad utveckling av geosfären från dagens förhållanden fram till nästa nedisning. Den allmänna transienta processen att beakta för grundvattenflöde är strandlinjeförskjutning på grund av landhöjning. Dessutom behöver densitetsberoende flöde och salthaltsfältutvecklingen behandlas eftersom förvarsplatserna ligger nära Östersjön.

Flera skalor är av intresse för flödesmodellering, från den regionala (längdskala 10 km), via den lokala (längdskala 1 km) till förvars-/blockskala (längdskala 10–100 m). Flödesmodellering ska utföras på alla skalor inom platsundersökningsprogrammet (men inte nödvändigtvis alla skalor för alla slutanvändare).

Grundvattenflödesmodellering för platsundersökningstillämpningar hanteras inom ramen för platsanalysprojekt. Modelleringen ska resultera i platsbeskrivningsmodeller, uttryckta genom RVS-verktyg och tillhörande rapporter. Den historiska utvecklingen av grundvattenflödesområdena är av primärt intresse i dessa analyser.

Platsanalysprojekten har beslutat att använda två separata grundvattenflödesprogram som hanteras av två oberoende modelleringsgrupper. Orsakerna till detta är två: För det första ger liknande resultat från två oberoende datorprogram trovärdighet åt analysen. För det andra betraktas oberoende modellering som en kvalitetskontroll på datahanterings- och modelleringsmetoderna. De två datorprogrammen som valts är CONNECTFLOW (NAMMU+NAPSAC) /Marsic et al, 2001, 2002/ och DarcyTools /Svensson, 2002a,b/.

CONNECTFLOW, framför allt NAMMU-delen, kan betraktas som en fortsättning av det stokastiska kontinuum-angreppssätt som initierats av SKB genom användning av

HYDRASTAR. Dessutom har NAMMU regelbundet använts i tidigare säkerhetsanalysstudier för analyser i regional skala (t ex SR 97). DarcyTools (tidigare PHOENICS) har utvecklats inom ramen för Äspö HRL och har med framgång tillämpats på olika modellberäkningar i fält- och laboratorieskala. Därmed är CONNECTFLOW och DarcyTools baserade på en annan uppsättning erfarenheter och rutiner inom SKB. Att påvisa likheten i resultat mellan dessa båda modeller utgör i sig en kvalitetssäkring.

De viktigaste utvecklingsstegen som skett i CONNECTFLOW sedan SR 97 är:

- Nästlade modeller kan användas i alla relevanta skalor. Möjlighet att nästla kontinuummodeller inom ett kontinuum, diskreta modeller inom ett kontinuum, eller kontinuummodeller inom en diskret modell. Nästlingen utförs utgående från en begränsnings-ekvation sådan att kontinuum bevaras mellan de olika skalorna. Nästlade modeller möjliggör t ex användning av en mindre lokal skala, eftersom transportvägar från den lokala skalmodellen obehindrat kan fortsätta in i den regionala skalmodellen. Nästlad modellering säkerställer dessutom automatiskt massabalans.
- Möjlighet att genomföra transienta, densitetsberoende simuleringar i nästlade modeller (inte i diskreta modeller).
- Transportresistansen kan beräknas för varje transportväg som leder genom diskreta spricknätverk inom den diskreta delen av CONNECTFLOW. Integrationen av transportresistans är exakt i den meningen att ytområdet med lokala sprickor och motsvarande flöde används i beräkningen.
- Möjlighet att studera konstruktionsfrågor (tunnlar och deponeringshål) med en kontinuum-representation av tekniska system inom en diskret representation av spricknätverk på förvar-/blockskala. Specifikt kan mer detaljerade indata till närzonsmodellen COMP23 erhållas (t ex värden för Q1 och Q2 i COMP23). Konsekvenser för radionuklidtransportmodellering av sådana detaljerade beskrivningar av tekniska barriärer/närzon diskuteras nedan i avsnitt 5.3.1.

De viktigaste utvecklingsstegen som skett i DarcyTools sedan SR 97 är:

- Implementering av en teknik för att få fram stokastiska kontinuum-hydrauliska konduktivitetfält baserat på underliggande diskreta spricknätverk. Det erhållna kontinuum-fältet uppvisar flera önskvärda egenskaper, som mer eller mindre självkonsistenta skalnings-egenskaper.
- Nästling av modeller med olika skalor möjlig. Även om nästlingen är automatisk måste emellertid flöden eller tryck överförs från en domän till nästa.
- Möjlighet att beräkna transportresistansen i hela domänen med den spricknätverksinformation som är tillgänglig från den underliggande diskreta spricknätverksmodellen.
- Introduktion av en ny lösare (MIGAL) som gör det möjligt att behandla stora modeller, även i överregional skala (längdskala 100 km).
- Transienta densitetsberoende modeller var tillgängliga redan vid publiceringen av SR 97. Emellertid innefattar DarcyTools nu även flerhastighetsdiffusion som en process som även påverkar salttransport. Denna egenskap anses vara avgörande för att korrekt modellera salthaltens utveckling.
- Introduktion av en partikelspåringsrutin (PARTRACK) som innehåller flerhastighetsdiffusion som en allmän retentionsmekanism. PARTRACK är inte avsedd för säkerhetsanalyser utan som en alternativ metod att analysera möjliga spårämnestest i samband med platsundersökningsprogrammet.

Det är en öppen fråga huruvida den dubbla grundvattenflödesmetoden bör tillämpas även säkerhetsanalyser, eller endast för platsundersökningsmodellering. För SR-Can kommer dock bara ett verktyg att användas. Förslaget är att basera grundvattenflödesmodelleringen för säkerhetsanalystillämpningar på CONNECTFLOW. Orsakerna är tillgängliga resurser snarare än tekniska överväganden.

Bland återstående problems som ska lösas före SR-Site kan nämnas (några av frågorna är planerade för lösning redan före avslutningen av SR-Can och är markerade med "\*" nedan):

- Koppling av platsbeskrivningsmodell (så som den uttrycks i RVS) och hydrogeologiska grundvattenflödesmodeller. (\*)
- Behandling av yhydrologi och ytnära hydrogeologi, och koppling till djupt grundvattenflöde respektive biosfärmodeller. En korrekt förståelse och hantering av yhydrologi ger en metod för att få fram korrekta vatteninfiltrationshastigheter till de djupare modellerna, och utgör samtidigt en bättre beskrivning av flödesvägarnas uppträdande i ytnära miljö. Sistnämnda fråga är viktig för att förutsäga korrekta positioner för radionuklidexfiltration i biosfären. Pågående forskning inom SKB visar att befintliga grundvattenflödesmodeller kan användas, om hög upplösning tillämpas nära ytan /Holmén och Forsman, 2003/. Specifikt måste kvartärgeologiska avsättningar modelleras med högre grad av realism. Konsekvenser av ökad realism för ytnära flöden på radionuklidtransport så som diskuteras i avsnitt 5.3. (\*)
- Ett antal konceptuella frågor med avseende på saltmodellering behöver bedömas. Bland dessa kan nämnas t ex bildning av salt i modellen, tillämpning av relevanta initialförhållanden och randvillkor för salt, och fastställande av starttidpunkt för simuleringar av densitetsberoende grundvattenflöde. (\*)
- Hanteringen av andra klimatrelaterade situationer som permafrost och periodisk nedisning. Dessa frågor diskuteras i avsnitt 5.4.
- Det finns ett behov, så som uttryckts i granskningen av SR 97, av att utnyttja geokemisk information för att utforma grundvattenflödesmodeller. Detta dikteras delvis av den stora tillgången på geokemiska data, delvis av övertygelsen om att sådana data faktiskt kan förbättra platsförståelsen och tilltron till modellen. En korrekt beskrivning av saltutvecklingen i grundvattenflödesmodeller kan betraktas som minimikrav på kompatibilitet mellan geokemi och hydrogeologi. Emellertid kan mera djupgående geokemisk modellering bedrivas. Erfarenhet från Äspö-arbetsgruppen (Task 5: Koppling av hydrogeologi och geokemi) visar att en sådan koppling kan vara svår att genomföra i praktiken. En bedömning av ambitionsnivån för SR-Can behövs.
- Frågor hänförliga till up-coning av saltvatten, återmättnad efter förvarsförslutning samt inverkan av återfyllningsmaterial- och EDZ-egenskaper på grundvattenflödessituationen i förvaret måste behandlas i säkerhetsanalysen. Specifikt kommer modellering av up-coning och återmättnad under driftsfasen att ge resultat för salthaltsfördelningen som kan fungera som utgångsförhållanden för simulering av den långsiktiga utvecklingen. Säkerhetsanalysen kan även behöva behandla otillräckligt tätade undersökningsborrhål. Datorprogrammen ska kunna hantera alla frågor som anges ovan, men detaljerade test behövs. (\*)
- Förutom up-coning och återmättnad är det av intresse för konstruktionsarbetet att studera andelen användbara deponeringshåll som används för olika antaganden med avseende på den strukturhydrauliska modellen. Ytterligare frågor av intresse för konstruktionsarbetet är förutsägelse av grundvatteninflöde till tunnelsystem för olika injekteringssituationer och vilka hydrauliska krav som bör ställas på olika förvarskomponenter (deponeringstunnlar, transporttunnlar, etc). Potentiella datorprogramförändringar som resulterar

av dessa analyser återstår att undersöka under det närmaste året eller kommande år. Emellertid förväntas den största arbetsuppgiften bli att tillämpa befintliga datorprogram för dessa speciella uppgifter. (\*)

- Simulering av brunnar är av intresse för säkerhetsanalysen. Detta gäller i synnerhet volymen av berg som påverkas av en brunn (insamlingszon för migrerande radionuklider) och utspädning i brunnen. I princip kan både DarcyTools och CONNECTFLOW hantera brunnar, men dessa egenskaper har inte testats noggrant för säkerhetsanalystillämpningar. Tillägget av ostrukturerade nätverk i DarcyTools (planerat för 2004–2005) kommer att göra det enklare att implementera brunnar i modellen. Inom SR-Can ska med exempel påvisas hur en brunn påverkar flödesfältet och eventuellt även radionuklidgenombrottet. Den största svårigheten med detta angreppssätt är att resultat är kraftigt beroende av hur problemet konfigureras. dvs helt olika resultat kan uppnås genom olika val av brunnsplatser och motsvarande hydrogeologiska förhållanden.

Tidsschemat för utvecklingsarbetet är enligt följande:

- Både CONNECTFLOW och DarcyTools är i princip klara för säkerhetsanalystillämpningar. Under våren 2003 kommer den slutliga implementeringen av transportmotståndsbereäkning att göras i CONNECTFLOW.
- Frågor hänförliga till ythydrologi undersöks för närvarande /Holmén och Forsman, 2003/. Dock kommer implementering av (en del av) den utvecklade metodiken i DarcyTools och CONNECTFLOW att behövas under 2004.
- Frågor hänförliga till saltmodellering och associerade initial-/randvillkor hanteras i modelleringsprojekten för platsbeskrivning och inget ytterligare behöver göras inom ramen för SR-Can.
- Koppling mellan geokemi och hydrogeologi bedrivs för närvarande i ett projekt inom Djupförvarsteknik vid Äspö. Syftet är att hantera alla relevanta data från Äspö och ta fram uppdaterade konceptuella modeller relativt 1997 års modeller. Föreslaget projektnamn: Reviderade hydrokemiska Äspö-modeller. Varaktighet: September 2003 – december 2004.

### 5.3 Transportmodellering för aktuella klimatförhållanden

Radionuklidtransport i geosfären beräknas i SKB:s modellkedja för säkerhetsanalys med hjälp av programmet FARF31 /Norman och Kjellbert, 1990/. FARF31 bygger på ett endimensionellt strömrörskoncept och inkluderar följande processer: Advektion, spridning, matrisdiffusion med jämviktssorption, och radioaktivt sönderfall (inklusive sönderfallskedjor). Immobiliseringsprocesser som har konstaterats uppträda i fält har av försiktighets-skäl inte inkluderats. Detta motiveras av förhållandet att det är svårt att övertygande visa att dessa processer gäller över den rums- och tidsskala som är av intresse för säkerhetsanalystillämpningar. Dessutom ingår kolloidtransport inte i FARF31 även om närvaro av kolloider i princip skulle indikera icke-konservativa konsekvenser för vissa relevanta förhållanden. Kolloider kommer istället att hanteras genom separata analyser, se avsnitt 5.3.2 nedan.

Transporten beräknas för multipla vägar (strömrör) som erhållits genom grundvattenflödesmodellering. Därmed beaktas spridning i fältskala automatiskt, genom användning av strömrör som har erfarit heterogena flödesförhållanden.



Longitudinell spridning längs ett strömrör ingår i FARF31-formeln genom användning av ett Peclettal (att formeln är baserad på ett konstant Peclettal istället för en konstant dispersivitet antyder att spridningen ökar med transportavståndet, så som har observerats i fälttest). Spridning, som är ett modellkoncept snarare än en fysisk process i verklig mening, har inkluderats för att beakta spridning på grund av småskalig heterogenitet som inte kan lösas med flödesmodellering.

En begränsning med 1D-formeln är att blandning mellan strömrör inte kan redovisas. Även om den konceptuella bilden av transport genom diskreta sprickor stöder en sådan formel har frekvent och tämligen stark kritik rests mot 1D-transportformler.

Kopplingen mellan de grundvattenflödesmodeller som beskrivs i avsnitt 5.2 och FARF31 är den advektiva transporttiden ( $t_w$ ) och, viktigare, transportresistansen ( $F$ ), beräknad med flödesmodellerna. Dessa två storheter fungerar som indata för individuella strömrör i FARF31 i formen  $t_w$  och  $a_w = F/t_w$  där  $a_w$  är flödesvätt yta per volymsenhet vatten.

Förutom de semianalytiska beräkningarna i FARF31 (PROPER-modulen och den oberoende versionen) där transportekvationer löses analytiskt i Laplace-rymden och numeriska rutiner används för inversion och faltning, har ett finit volymbaserat program tagits fram för att numeriskt lösa transportekvationer (i längs- och tvärriktning). Medan den semianalytiska lösningen begränsar vilken typ av problem som går att lösa tillåter den finita volymimplementeringen gränssättande beräkningar där inverkan av olika randvillkor, matrisegenskaper, tillkommande transportmekanismer etc kan testas. Den grundläggande idén bakom den finita volymmetoden är att använda en integrerad form för de styrande ekvationerna och lösa dessa över ett finit antal element som representerar beräkningsdomänen. För varje element kan aktiviteten förändras, antingen genom inflöde/utflöde av material över elementens gränser eller genom att material skapas/förstörs inom volymen. Eftersom flödet över elementens gränser är en funktion av aktiviteten i intilliggande element (beroende på problemet kan denna approximation ha varierande grader av komplexitet), erhålls ett ekvationssystem som kan lösas med en lämplig konventionell lösare.

Hittills har den finita volymimplementeringen utförts i Matlab-miljö med inbyggda lösare med adaptiv tidsstegning som lämpar sig för den långsiktiga tidsskala som gäller i det aktuella fallet. Dessa har valts för att förenkla kodningen och det finns i princip ingenting som hindrar att modellerna implementeras på andra plattformar/tillämpningar än Matlab, t ex som ett oberoende C- eller Fortran77-program, exekverat som en del av Proper-beräkningskedjan. Den finita volymimplementeringen har testats i flera olika gränssättande beräkningar.

Möjligheten att utföra gränssättande beräkningar för att undersöka jonsekvenserna av ändrade matrisegenskaper och kolloidala transporter är områden där implementeringen har uppvisat lovande resultat. Emellertid har den aktuella versionen av finit volymimplementering visat sig vara processorintensiv i jämförelse med Proper FARF31-implementeringen. Därför kan programmet vara lämpligare för gränssättande beräkningar än för probabilistiska säkerhetsanalyser. Med bättre förståelse för fysiska problem och relevanta parameterintervall torde tillämpningen bli snabbare och kan till och med visa sig lämplig för probabilistiska beräkningar.

Möjligheten att seriekoppla flera Proper FARF31-moduler för att ta hänsyn till effekten av föränderliga longitudinella egenskaper (en så kallad segmenterad FARF31) har utvecklats. Den segmenterade FARF31 har jämförts med den finita volym-FARF31 och har stått sig väl.

Frågor hänförliga till hur transportresistansen ska definieras och beräknas i olika flödesmodeller är föremål för det pågående EU-projektet RETROCK. I princip gäller att transportresistansen för enskilda sprickor kan beräknas som  $F=2LW/Q$  eller  $F=tw/B$  där  $L$  och  $W$  är sprickans längd respektive bredd,  $Q$  är det volymetriska flödet, och  $B$  är halva sprickans öppning. Även om de två formlerna av uppenbara skäl är identiska för sprickor med givna mått och flödesförhållanden förespråkar SKB att den första formeln ska användas för säkerhetsanalystillämpningar eftersom den är mera kompatibel med storheter som tillhandahållas av flödesmodellerna. Dessutom erbjuder den en konceptuell fördel eftersom  $2LW$  lätt kan tolkas som "flödesvätt yta".

I platsanalysprojektet genereras platsbeskrivningsmodeller för transportegenskaper. I korthet ger dessa modeller olika sprickor (strukturer) och bakgrundsbergarter med givna retentionsegenskaper. Sprickorna (strukturerna) läggs sedan in i en 3D-strukturgeologisk beskrivning av platsen. Strategin för ändamålet kan baseras på olika grader av komplexitet, där den enklaste nivån skulle vara att samma strukturtyp fyller hela domänen. En något mera komplex strategi skulle t ex vara olika strukturtyper i olika delar av domänen, baserade på höjd över havet eller dominerande geologi. En ännu mera komplex strategi skulle vara ett fall där strukturtypen korreleras till någon sprickegenskap, som t ex spricklängd. Sistnämnda angreppssätt testas för närvarande inom Task 6 vid Äspö-arbetsgruppen.

Platsbeskrivningsmodellerna för transportegenskaper kommer troligen att indikera att retentionsparametrarna (som  $K_d$ -värden, diffusiviteter och matrisporositeter) kommer att uppvisa en rumslig variabilitet. För sådana fall måste säkerhetsanalysen anta en strategi för hantering av rumsligt variabla matrisparametrar. Detta kan genomföras på två sätt:

- Ett enstaka realistiskt (typiskt) eller pessimistiskt värde väljs för hela domänen. Att helt enkelt välja genomsnittliga värden för retentionsparametrar kommer inte att resultera i matematiskt korrekta värden. Valet måste alltså baseras på andra argument.
- Ett korrekt genomsnittligt värde kan beräknas, men i detta fall måste genomsnittsberäkningen göras tillsammans med beräkningen av transportresistans ( $F$ ) i flödesmodellerna. I korthet måste produkten av  $F$  och en grupp retentionsparametrar integreras längs flödesvägarna. Detta antyder att retentionsparametrarna behöver läsas in i flödesmodellen. Dessutom får FARF31 indata som redan innehåller matrisinformationen. Detta innebär datorprogramförändringar för både grundvattenflödes- och radionuklidtransportmodellerna.

För konstruktions- (och säkerhetsanalys-) tillämpningar, är den diskreta formeln för tunnlar och kapseldeponeringshål i hydrogeologiska modeller av intresse, så som diskuteras ovan, jfr avsnitt 5.2. Följaktligen behöver transport i tunnlar redovisas. Hur detta kan uppnås med FARF31 diskuteras nedan, i avsnitt 5.3.1. I korthet är den grundläggande tanken att ha två separata modeller, en för transport i tunnlar och en för transport i berg. Utdata från tunnelmodellen utgör sedan indata för bergsmodellen, dvs de två modellerna kommer att vara kopplade på samma sätt som COMP23 och FARF31 är kopplade idag. FARF31 som beskriver transport i tunnlar behöver modifieras för att innefatta de korrekta processerna. Eftersom återfyllningen sannolikt kommer att bestå av ett granulärt material är de relevanta processerna ytsorption (jämförbar med jämviktssorption i vattenreservoarer), eller möjligen matrisdiffusion i volymer (sfärer) av finit utsträckning med efterföljande sorption på innerytan.

En öppen fråga är om radionuklidtransport nära den övre ytan ska hanteras explicit i geosfärprogrammen. Grundvattflödesmodellerna hanterar i viss utsträckning ytnära hydrologi för att förutsäga korrekta exfiltrationspunkter, se diskussionen ovan i avsnitt 5.2, men det är inte entydigt att transport, och specifikt retention, ska hanteras i ett FARF31-liknande

program. Snarare kan processerna till en viss del redan vara inkorporerade i sk compartment-modeller för biosfären. Exakt var gränssnittet mellan geosfär och biosfär befinner sig vad gäller radionuklidtransport är fortfarande oklart. Denna fråga måste behandlas tidigt i SR-Can-projektet.

Vid sidan om utvecklingsarbetet som beskrivs ovan kan två fundamentala begränsningar med avseende på den beskrivna modelleringsstrategin medföra ytterligare utveckling av stödprogram och beräkningar. Dessa är:

- Strömrörskoncept är strikt giltigt endast för konstanta flödesförhållanden. Transienta flöden som beror på strandlinjeförskjutningen bryter mot antagandena i strömrörskonceptet. För att bedöma effekterna av transient flöde på radionuklidtransport tillämpas gränssättande beräkningar med hjälp av programmet CHAN3D där flöde och transport löses samtidigt. Hypotesen är att effekterna kan påvisas vara små (åtminstone i statistisk mening) så att gränssättande situationer/förhållanden kan definieras. Om hypotesen visar sig vara felaktig har vi en stor utvecklingsuppgift framför oss. I princip kommer angreppssättet baserat på separata flödes- och transportmodeller att kollapsa, och ett nytt verktyg där flöde och transport är integrerade måste föras in i modellkedjan för säkerhetsanalys.
- Integrationen av transportresistans ( $F$ ) i flödesmodeller är inte korrekt när sönderfalls-kedjor beaktas. Även här ska gränssättande effekter studeras. Verktyget för en sådan analys är en nyligen utvecklad segmenterad version av FARF31. I korthet jämförs den standardiserade FARF31 med integrerade parametrar med en segmenterad FARF31 med likformiga parametrar för varje subdomän. Genom att behandla flera parameterkombinationer bör det vara möjligt att få god kunskap om när det integrerade angreppssättet fungerar och när det inte fungerar. Hur man slutligen ska hantera sönderfallskedjor i SR-Can och SR-Site är en öppen fråga och beror på resultatet av jämförande beräkningar. Sett till genomförbarhet är det inte attraktivt att ersätta dagens standardiserade semianalytiska FARF31 med en segmenterad motsvarighet för merparten av de beräkningar som ska utföras inom SR-Can och SR-Site.

Tidsschemat för utvecklingsarbetet med FARF31 är enligt följande:

- En möjlig numerisk beräkning för att bedöma 1D-antagandena i FARF31 är modelltransport i DarcyTools på två olika sätt. För det första kan transporten modelleras som advektiv partikelspårning, vilket motsvarar den Lagrangebaserade strömrörformeln. För det andra kan transporten modelleras genom en advektion-spridning-ekvation i Eulersk mening, för samma hydrostrukturella modell. Genom att använda hydrostrukturella modeller med olika egenskaper, från homogent porösa mediemodeller till diskreta nätverk nära perkolationsströskeln, ska det vara möjligt att visa att 1D-formel är lämplig för det diskreta system vi är intresserade av. En modellberäkning av denna typ ska genomföras före färdigställandet av SR-Site.
- EU-projektet RETROCK ska avge sin slutrapport i slutet av 2004. Redan nu (mitten av 2003) har vi tämligen god kunskap om de resultat som ska presenteras i rapporten. I princip vet vi alltså hur beräkningen av transportresistans ska formuleras, dvs för säkerhetsanalystillämpningar ska vi använda sprickyta  $LW$  och flöde  $Q$  snarare än advektiv transporttid och spricköppning för beräkning av  $F$ .
- Strategi som ska användas i platsanalysprojekten för att erhålla platsbeskrivningsmodeller för transportegenskaper ska fastställas under andra (eller tredje) kvartalet 2003. Vissa ytterligare indata kan komma in från Task 6 inom Äspö-arbetsgruppen, som kommer att slutföras under 2005. Emellertid torde indata från Task 6 inte medföra några ändringar i strategin, utan snarare underbygga den.

- Gränssättande beräkningar med avseende på transienta flöden pågår och kommer att avslutas under 2003. En presentation av preliminära resultat har getts vid MRS 2003 /Moreno et al, 2003/ och ytterligare resultat kommer att presenteras vid Migration 03.
- Gränssättande beräkningar med avseende på sönderfallskedjor och implementering av kolloider i den numeriska versionen av FARF31 kommer att inledas hösten 2003.

### 5.3.1 Strategi för modellering av radionuklidtransport i deponeringstunnlar

I tidigare säkerhetsanalyser har radionuklidtransport i deponeringstunnlar försumrats. Orsakerna till detta är två: För det första har tunnarna förutsatts återfyllas med ett material med en permeabilitet minst så låg som medelvärdet för omgivande berg, och för det andra har analysverktygen inte kunnat hantera transport i tunnlar.

De nyligen utvecklade grundvattenflödesmodellerna kan ge detaljerade indata till närzonsmodellen COMP23 (avseende Q1 och Q2), se figur 8-3, avsnitt 8.2.2. Även den detaljerade beskrivningen av flödesförhållanden i närzonen ställer nya krav på geosfärtransportbeskrivningen, så som implementerats i FARF31. Specifikt måste korrekta retentionsfenomen föras in i FARF31, och multipla utläppsvägar från enstaka kapselpositioner hanteras. Dessa frågor behandlas ytterligare nedan. Emellertid presenteras först en beskrivning av olika tunnlefall.

Inom SR-Can föreslås följande tunnelanalyser:

1. Goda återfyllningsegenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten är  $<10^{-11}$  m/s. Diffusionsdominerad transport i tunnlar.
2. Återfyllningsegenskaper enligt givna krav. Den hydrauliska konduktiviteten är  $\sim 10^{-10}$  m/s. Både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer.
3. Dåliga återfyllningsegenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten är  $>10^{-8}$  m/s. Diffusion i tunnlar kan försummas.
4. Återfyllningen saknar svällningsegenskaper. Det finns spalter mellan återfyllning och omgivande berg. Dessa spalter är högradigt konduktiva.

Fall 4 kan kombineras med fall 1–3. Det sannolikt mest försiktiga antagandet är att kombinera fall 4 med fall 1.

De ovan listade fallen kan analyseras med lätt modifierade versioner av COMP23 och FARF31 med indata från CONNECTFLOW. Från en CONNECTFLOW-modell med explicit implementerade tunnlar och deponeringshål (som kontinuum-representationer) inom ett diskret spricknätverk, erhålls information om sprickskärningar med kapselhålen och därav följande flöde i sprickorna. Denna information ger Q1. Även flödet i EDZ kan erhållas, och det ger indata på Q2. COMP23 diskretiseras till att omfatta endast deponeringshålet, dvs ingen del av deponeringstunnlarna ingår i COMP23. Förutom de transportkomponenter som beskrivs med Q1 och Q2 transporteras nuklider i deponeringshålet till tunneln genom diffusion. Alltså producerar COMP23 tre separata utflöden som ska hanteras av geosfärtransportmodellen FARF31.

Olika versioner av COMP23 skulle också kunna användas för olika typer av sprickskärningar relativt deponeringshålen. En öppen fråga är hur resterande sprickor från genereringen av diskreta sprickor kommer att påverka beräkningen av Q1. Mindre resterande sprickor resulterar i ett större antal skärningar, men en viss tröskel ska uppnås där

tillkommande sprickor har så lågt flöde att de är försumbara i jämförelse med Q2. Denna fråga måste hanteras med känslighetsanalyser.

De tre utflödena från COMP23 (dvs baserade på Q1, Q2 och diffusionstransport från deponeringshålens till tunnelgolv) skulle hanteras av separata FARF31-modeller. Detta medför att partiklar måste släppas ut vid skärningen spricka/deponeringshål, vid EDZ, och vid gränssnittet mellan deponeringshålen och tunnarnas golv. För alla tre startpositionerna skulle transportvägarna följas genom tunnlar och bergssystem, ut till modellavgränsningarna. Längs varje transportväg måste F-faktorn och den advektiva transporttiden integreras. I praktiken skulle detta göras genom att registrera hur mycket av transportvägen som går genom tunnlar och hur mycket genom intakt berg. I varje subdomän integreras F-faktorn och transporttiden, och de efterföljande modellerna kopplas på samma sätt som den segmenterade versionen av FARF31 som diskuteras i avsnitt 5.3. FARF31-modellen som beskriver tunneltransport skulle behöva uppdateras med lämpliga retentionsmekanismer. Två alternativ ska behandlas: Jämviktssorption resulterande i en enkel fördröjningskoefficient, och diffusion till ett granulärt medium med efterföljande sorption på innerytorna av det granulära materialet. Sistnämnda konceptuella modell kan implementeras med hjälp av den flerhastighetsformel som ingår i DarcyTools.

Beskrivningen ovan gäller för fall med advektion i tunnlar, dvs fall 2–3 ovan. För fall 1 skulle transport i tunnlar försummas för analyser som ska utföras inom SR-Can.

Genomförbarhetsstudien ovan kräver stora resurser. Preliminära resultat kan bli tillgängliga för SR-Can, men en vältestad och dokumenterad strategi baserad på omfattande analyser kommer inte att vara klar före SR-Site. Utvecklingen ovan skulle emellertid ge en mera realistisk uppskattning av fördröjningskapaciteten hos närzonsberget i jämförelse med den som erhålls med låg upplösning i tidigare flödesmodeller.

Det är viktigt att komma ihåg att när CONNECTFLOW körs som rent kontinuum kommer vi fortfarande inte att kunna lösa transporten i närzonsskala. Detsamma gäller för DarcyTools, där en kontinuum-formel alltid används. För dessa fall kommer COMP23 och FARF31 att köras på det gamla sättet, dvs ett flödesvärde matas in i COMP23, och transportmodellkedjan körs på samma sätt som beräkningar i SR 97.

### **5.3.2 Kolloidtransport**

I SR 97 har inte kolloidtransport i geosfären behandlats explicit, men referenser har getts till tidigare SKB-arbete, där det argumenteras att kolloider troligen inte utgör ett problem, i första hand eftersom deras koncentrationer i svenska grundvatten är tillräckligt låga.

I en nyligen utgiven rapport /Klos et al, 2002/ utsluts inte att kolloider skulle kunna vara ett problem. Kinetisk sorption på kolloider behandlas. Det påvisas, med hjälp av bland annat SR 97, Aberg-data, att kolloider skulle kunna ge betydande dosbidrag för de studerade fallen, beroende på sorptionsprocessens kinetiska egenskaper. Det är emellertid endast en begränsad kombination av parametervärden som skulle kunna ge sådana resultat, och det är oklart om de alla är realistiska.

En rimlig slutsats skulle vara att kolloidtransport fordrar en mera utförlig behandling i SR-Can än i SR 97. Både en mera detaljerad mekanistisk behandling och möjliga kolloidkoncentrationer för olika grundvattensituationer (se avsnitt 5.5) behöver beaktas.

En möjlighet skulle vara att inkludera kinetisk sorption på kolloider i den nyligen utvecklade numeriska versionen av transportmodellen FARF31 (avsnitt 5.3) och studera ett antal fall. Om möjligt ska även kedjesönderfall (ej behandlat i nämnda rapport) ingå. En stor

deluppgift skulle vara att utvärdera tillgängliga data och välja data för en förstudie och för SR-Can.

Det återstår att fastställa vilka egenskaper som ska ingå i modelleringen, vilka data detta kräver och hur dessa data ska erhållas.

Vidare återstår att etablera en tidplan för hur frågorna som diskuteras i detta avsnitt (dvs hela avsnitt 5.3) ska implementeras i transportmodelleringsarbetet inom SR-Can-projektet, med tanke på a) interimrapporten av SR-Can som ska levereras sommaren 2004 och b) slutrapporten av SR-Can som ska levereras i december 2005.

## **5.4 Modellering av grundvattenflöde och radionuklidtransport för klimatscenarier**

Aktuella verktyg och utvecklingsbehov med avseende på grundvattenflöde och radionuklidtransportmodeller beskrivs nedan för tempererat tillstånd, permafrosttillstånd och glacialt tillstånd (dvs de klimatdrivna processtillstånden). Dessutom diskuteras i korthet hanteringen av kopplingar/beroenden mellan tillstånd, och mellan hydrogeologi/transport och andra geovetenskapliga områden.

### **5.4.1 Tempererat (interglacialt) tillstånd**

Det tempererade tillståndet är det som typiskt behandlas mest detaljerat i aktuella säkerhetsanalysstudier (i jämförelse med de båda andra tillstånden). Därför är de flesta modelleringsverktyg skraddarsydda för att hantera situationen som råder vid tempererat tillstånd. Detta gäller i synnerhet för utvecklingen av CONNECTFLOW (NAMMU-NAPSAC) och DarcyTools som har bedrivits vid SKB efter avslutningen av SR 97, se avsnitt 5.2. De huvudsakliga nya funktionerna i jämförelse med SR 97, är förmågan att hantera transienta och densitetsdrivna flödesförhållanden. Utvecklingen i geosfären på grund av strandlinjeförskjutningen kan därmed modelleras realistiskt. Se vidare i avsnitt 5.2.

Med den utveckling som nämnts ovan förutsätts att grundvattenflödesmodelleringen är adekvat för det tempererade tillståndet. Med avseende på transportmodellering måste emellertid påvisas att transienta flödesförhållanden som beror på strandlinjeförskjutningen kan approximeras till stabila förhållanden, så att strömrörskonceptet fortfarande är en giltig transportbeskrivning, se avsnitt 5.3.

### **5.4.2 Permafrosttillståndet**

Permafrosttillståndet innebär inte några direkta konceptuella förändringar för modellerna, utan snarare förändringar i modellparametersättning och möjligen förändringar i randvillkor. Specifikt kommer den hydrauliska konduktiviteten att reduceras i den övre delen av geosfären där marken är frusen, möjligen till några hundra meters djup.

Bland övriga frågor att beakta kan nämnas modelleringen av talikar där det kan förekomma höga koncentrationer av lösta ämnen och utspädning vid ytan under sommarperioder. Sistnämnda fråga kan hanteras med tidsvariabla randvillkor.

Även transport kan hanteras med modifierade parametrar, t ex kan  $K_d$ -värden behöva förändras för att avspegla förändringar i grundvattenkemin.

### 5.4.3 Det glaciala tillståndet

Förändringarna i geosfären och geosfärens omgivning är troligen mycket större för det glaciala tillståndet än för permafrosttillståndet. Två alternativ tycks föreligga för att hantera detta tillstånd: En enklare version där förändringar hanteras med förändringar i parametrar och randvillkor, eller en mera omfattande analys där faktiska förändringar simuleras direkt i grundvattenflödesmodellen. De två alternativen beskrivs nedan.

För det enklare alternativet gäller att glacialt tillstånd i första hand innebär förändringar i parametrar och randvillkor. Hydrauliska konduktiviteter behöver modifieras där istunnlar bildas och randvillkor som är specifikt relaterade till infiltration behöver ändras. Även här kan transporten hanteras med modifierade parametrar, t ex kan  $K_d$ -värden behöva förändras för att avspegla förändringar i grundvattenkemin. Det största utvecklingsbehovet för denna version förefaller vara att få fram relevanta randvillkor som avspeglar de glaciala förhållandena. Storskaliga klimatmodeller som ska utvecklas måste kunna ge erforderliga randvillkor.

Det mer omfattande alternativet innebär att aktuella grundvattenflödesmodeller kopplas till klimatmodeller så att utvecklingen av glaciärer, istunnlar och infiltrationszoner beskrivs explicit i grundvattenflödesmodellen. Detta torde vara en tämligen tidsödande uppgift. Dessutom behöver randvillkor och initialförhållanden för klimatprocesser i den kopplade modellen hämtas från storskaliga klimatmodeller. Detta alternativ förefaller snarare vara ett forskningsämne än ett realistiskt alternativ att implementera i SR-Can.

Därför kommer det enklare alternativet att implementeras i SR-Can. Den möjliga utvecklingen av det mer omfattande alternativet kommer att beaktas i SKB:s uppdaterade FUD-program som ska presenteras under 2004. Bilateralt samarbete kan vara ett alternativ för utvecklingsarbetet (OPG-Kanada).

### 5.4.4 Koppling mellan olika klimattillstånd

De tre identifierade klimatdrivna processtillstånden utgör en användbar beskrivning för att exemplifiera typiska förhållanden under olika tidsperioder. Emellertid är det i realiteten uppenbart att en kontinuerlig utveckling fortgår inom varje tillstånd, och att det inte går att dra någon skarp gräns eller göra en distinktion mellan de olika tillstånden. Under ett tempererat tillstånd kan till exempel temperaturerna långsamt sjunka, så att områden med permafrosttillstånd långsamt utvecklas inom delar av geosfären.

Ur modelleringssynvinkel förefaller det logiskt att beskriva den kontinuerliga förändringen i parametrar och/eller randvillkor så att de tre tillstånden resulterar av analysen (modellering) snarare än från specifika indata till modellen. Men detta kan vara svårt att uppnå i praktiken (lång simuleringsstid, inga välkända förändringar i parametrar och randvillkor etc), och därför kommer vi eventuellt att begränsa oss till användning av separata modeller (specifikationer) för olika tillstånd. Om detta är fallet kan det vara svårt att förklara vad som händer i övergångarna från ett tillstånd till nästa. Troligen kommer dessa övergångar att vara intressanta ur flera aspekter. Därför kan det visa sig problematiskt att bygga en robust säkerhetsargumentation utan att kunna beskriva utvecklingen i geosfären kontinuerligt.

Utvecklingen av modeller som beskriver den kontinuerliga förändringen i geosfärförhållandena ska därför utvecklas inom SKB:s FUD-program. Slutgiltiga resultat behövs inte på många år, men vi vill kunna visa att arbete pågår. Dessa typer av modeller används för närvarande i relaterade fall, utanför kärnavfallsområdet, och det är troligt att våra granskare kommer att förvänta sig att vi drar nytta av utvecklingen inom angränsande områden.

### 5.4.5 Koppling mellan grundvattenflöde/transport och relaterade ämnesområden

Ett vanligt argument är att kopplade processer, som mekanisk-hydrogeologiska processer, inte är relevanta för normala förhållanden (dvs för tempererat tillstånd). Emellertid är det för glacialt tillstånd enkelt att föreställa sig att mekaniska processer kan påverka hydrogeologiska processer. Till exempel kan belastningen från en glaciär ge upphov till en omfördelning av spänningsfältet, med konsekvenser för bergmassans permeabilitet, varefter avlastning av bergmassan (dvs när glaciären smälter) kan ge upphov till jordskalv med förändringar i sprickegenskaper och/eller bildning av nya sprickor. Se vidare i avsnitt 5.1.5. Modeller som kopplar samman mekaniska och hydrogeologiska processer är idag snarare forskningsverktyg än modeller för tillämpning i en säkerhetsanalys.

Även andra kopplingar kan bli aktuella, t ex mellan hydrogeologi och hydrokemi. Särskilt under glacialt tillstånd förefaller det sannolikt att grundvatten med olika egenskaper kan komma in i geosfären, och att det kan bli konsekvenser för grundvattenflöde (t ex förändringar i permeabilitet på grund av nederbörd/upplösning) och grundvattentransport (förändringar i sorptionsegenskaper på grund av förändringar i grundvattenkemin). Sistnämnda fråga kan troligen hanteras genom förändringar i  $K_d$ -värden i transportmodellen, medan den förstnämnda kopplingen förblir mera av ett forskningsämne (även relevansen kan ifrågasättas).

Av ovanstående frågor är det bara påverkan av grundvattenkemin vid transport som direkt kan behandlas i flödesmodelleringen inom SR-Can. Betydelsen av återstående frågor måste bedömas på annat sätt.

### 5.4.6 Sammanfattning

Tillgängliga grundvattenflödes- och radionuklidtransportmodeller förefaller adekvata för behoven i SR-Can. Emellertid fordras en bättre förståelse av förändringar i parametrar (t ex permeabilitet) och randvillkor, särskilt för flödesmodeller under glacialt tillstånd och möjligen även under permafrosttillstånd.

Kopplingen mellan olika tillstånd kan visa sig vara problematisk om inte en kontinuerlig utveckling över tiden kan modelleras. Det är möjligt att övergångsperioder från ett tillstånd till nästa kan medföra förhållanden som är kritiska för förvarets prestanda. I princip ska det vara möjligt att modellera en kontinuerlig utveckling med aktuella grundvattenflödesmodeller.

För det glaciala tillståndet kan det visa sig vara viktigt att koppla samman mekaniska och hydrogeologiska processer. Specifikt kan konsekvenserna av islasten på permeabiliteten, och inverkan på sprickegenskaper från avlastning vara viktiga att behandla.

Vidare återstår att etablera en tidplan för hur frågorna som diskuteras i detta avsnitt ska implementeras i flödesmodelleringsarbetet inom SR-Can-projektet, med tanke på a) interimrapporten av SR-Can som ska levereras sommaren 2004 och b) slutrapporten av SR-Can som ska levereras i december 2005. En permafrostmodelleringsstudie ska genomföras under första halvan av 2004, se avsnitt 3.5. En sådan studie skulle kunna ge randvillkor och information om permafrostens utsträckning och djup för en efterföljande hydrogeologisk modelleringsstudie. För glacialt tillstånd fordras hydrogeologiska simuleringar för vidare användning i hydrokemiska analyser. Befintliga modellresultat kan användas. Uppdaterade modeller ska köras endast om nya randvillkor erhålls.



## 5.5 Geokemi

### 5.5.1 Inledning

Kemisk utveckling av buffert, återfyllning och berg styrs ytterst av grundvattnets sammansättning och flöde. På lång sikt är det grundvattnets kemiska egenskaper, tillsammans med egenskaperna hos buffert och kopparkapsel, som avgör hur länge buffert och kapsel kommer att fungera som avsett.

Transport- och reaktionsprocesser påverkar de kemiska egenskaperna hos grundvatten kring djupförvaret. Den dominerande transportprocessen är advektion, men diffusion spelar också en roll. Reaktionen uppträder mellan grundvattenkomponenter, och mellan grundvatten och spricktytor i form av lösning/fällning av material som fyller sprickorna. Dessutom sker reaktioner mellan grundvatten och mineraler i berget, om än mycket långsamt. Mikrobiella processer sker i grundvattnet och i biofilmer som utvecklas i spricktytor etc. Mikrobiella processer påverkar nedbrytningen av material från förvarsbyggnaden, kolloidbildning, gasproduktion/-förbrukning, redoxreaktioner etc.

Kemiska reaktioner och mikrobiella processer drivs av koncentrationsgradienter och av förändringar över tiden. Klimateffekter, strandlinjeförskjutning, etc påverkar hydrologin och följaktligen den geokemiska sammansättningen av grundvatten kring djupförvaret. Det föränderliga klimatet orsakar dramatiska rörelser i grundvattnet, som påverkar geokemin vid och kring djupförvaret.

Nedan diskuteras behandlingen av geokemiska frågor i SR-Can. Följande frågor behandlas:

- Geokemi för förvarssystemet vid förslutning.
- Initial tidsutveckling av grundvatten (0 till 1 000 år).
- Ytterligare tidsutveckling av grundvatten under den första glaciationscykeln (1 000 till ~120 000 år).

Utvecklingen av grundvattnets geokemi för senare nedisningscykler förväntas följa de trender som diskuteras för den första nedisningen och kommenteras inte mera här.

I SR 97 innesluts tidsutvecklingen hos grundvattnet under en glaciationscykel i huvudsak mellan två extrema grundvattentyper: den ”salina isfronten” och den ”icke-salina smältzonen”. Saltvattnet vid isfronten uppträder som följd av hydrauliska lyfteffekter.

### 5.5.2 Geokemi för förvarssystemet vid förslutning

#### **Beskrivning**

Grundvatten genomgår stora förändringar i sammansättning kring djupförvaret under dess långa drifttid. Vissa förändringar orsakas av strandlinjeförskjutning och klimatvariationer, men även närvaron av förvaret ger upphov till betydande grundvattenförändringar. Det är viktigt att ha en djup förståelse för förvarets kemiska status vid förslutning för att kunna beskriva dess omedelbara geokemiska utveckling efter förslutning (dvs: hur snabbt återgår systemet till ett ” normalt ” tillstånd?).

- En viktig fråga är den rumsliga utbredningen och sammansättningen av stort grundvatten.
- Effekter av avsänkning (mera meteoriskt vatten) och up-coning av saltvatten.
- Effekter av injekteringsbetong, sprutbetong och betonglakvatten på pH, etc.

- Effekter av organiskt material (urin, tobak, plast, cellulosa, hydraulolja, ytaktiva ämnen och cementtillsatser).

Återfyllningens reducerande kapacitet är också av vikt för kopparkapslarnas integritet. Tiden för O<sub>2</sub>-förbrukning i återfyllningen under återmättnadsfasen kan användas för att illustrera denna kapacitet.

Under driftsfasen kommer inflöde av grundvatten i tunnlar och blandning av grundvatten i sprickor troligen att resultera i utfällning av stora mängder Fe(OH)<sub>3</sub> och kanske CaCO<sub>3</sub>. Inverkan av dessa fasta ämnen ur kemisk och mikrobiologisk synvinkel måste studeras.

En annan viktig fråga är förväntad utveckling av den mikrobiella populationen under drift och under återmättnadsfasen. Man kan förutse att dessa förändringar i mikrobiella populationer skulle kunna ge upphov till ökande koncentrationer av kolloider och organiskt material.

### **Plan**

Flera rapporter behövs som bas för utvärdering av geokemiskt tillstånd för förvaret vid förslutning. Målet är att ha alla rapporter klara för interimrapporten av SR-Can i juli 2004. Följande studier förutses: Den rumsliga utbredningen av förvarets störning av grundvattnet, tiden för O<sub>2</sub>-förbrukning under återmättnadsfasen och mikrobiologisk utveckling av förvaret.

Den hydrogeokemiska analysgruppen (HAG) inom SKB:s platsundersökningsprogram kommer att studera möjlig inverkan från utfällning av järnhydroxider och kalcit kring djupförvaret under driftsfasen. Dessa beräkningar ligger utanför platsundersökningsuppgiften, men använder samma modelleringsverktyg som för att etablera platsmodeller.

### **5.5.3 Initial tidsutveckling av grundvatten (0 till ~1 000 år)**

#### **Beskrivning**

Under denna period förväntas ett tempererat klimat och det är fullt möjligt att detta klimat-tillstånd varar längre än tusen år. Förskjutningen av den baltiska kustlinjen och förändringar i årlig nederbörd kommer att påverka platsens hydrologi och därmed den geokemiska sammansättningen av grundvatten kring djupförvaret. Det förväntas att halterna av meteoriskt vatten och möjligen Östersjövatten i grundvattnet kommer att öka under denna period.

De flesta befintliga flödes- och transportmodelleringsverktyg är väl lämpade för hantering av förhållanden som råder under det tempererade tillståndet. Program som CONNECTFLOW eller DarcyTools har förmågan att modellera transienta och salthaltsdrivna flödesförhållanden. Utvecklingen av grundvattenflöde och salthalt på grund av strandlinjeförskjutningen ska alltså vara möjlig att modellera realistiskt. Se även avsnitten 5.2 och 5.4. Sådana beräkningar måste beakta tillståndet för grundvatten kring djupförvaret vid förslutning.

Resultat från en regional modell av saltfördelning som funktion av tid kan översättas till blandningsproportioner av referensvatten om händelseföljden på platsen också är känd. I detta fall kan ett inflöde av meteoriskt vatten och/eller Östersjövatten också ges av hydrologisk modellering och dess randvillkor. All denna kunskap kommer att användas som indata till M3-modellen /Laaksoharju et al, 1999/ för att beräkna blandningsproportioner mellan olika grundvattentyper: meteoriskt vatten, Östersjövatten, mättad saltlösning, etc. De inledande och avslutande blandningsproportionerna för vatten kan sedan användas för

att beräkna samverkan mellan berg och vatten, t ex kalcitupplösning, med ett annat välkänt program som t ex PHREEQC för att ge andra parametrar som pH, alkalitet, och redox-potential.

### **Plan**

En regional platsmodell för salthaltfördelningen som funktion av tid för det tempererade klimattillståndet uppnås så som anges i avsnitt 5.4 av denna rapport.

Den hydrogeokemiska analysgruppen (HAG) inom SKB:s platsundersökningsprogram kommer att använda den regionala modellen för hydrologi och salthalt för att utvärdera proportionerna av olika vattentyper och beräkna samverkan mellan vatten och berg. Dessa beräkningar ligger utanför platsundersökningsuppgiften, men de tillämpar, samma modelleringsverktyg som för att etablera platsmodeller. Målet är att färdigställa denna bedömning i december 2004, beroende på resultatet av hydrologi- och salthaltsmodellen.

## **5.5.4 Ytterligare tidsutveckling av grundvatten under den första glaciationscykeln (~1 000 till ~120 000 år)**

### **Beskrivning**

Under denna period förväntas klimatförändringarna vara mera dramatiska än under den initiala temperaturfasen av ~1 000 år eller mera. Tre allmänna klimatprocesstillstånd råder omväxlande (kapitel 3): tempererat tillstånd, permafrosttillstånd, och glacialt tillstånd. Detta påverkar i hög grad flöde och sammansättning av grundvatten. Så som indikeras i avsnitt 5.4, förefaller det emellertid inte vara lämpligt att göra några detaljerade hydrologiska beräkningar som funktion av tid. Detta skulle kräva kontinuerlig tidsberoende förändring av parametrar och/eller randvillkor så att de tre processtillstånden resulterar ur modelleringen. Detta är svårt att uppnå i praktiken på grund av lång simuleringstid och stor osäkerhet kring förändringar i parametrar och randvillkor. Därför begränsas modelleringen till användning av separata specifikationer för olika klimattillstånd.

De tre klimatdrivna processtillstånden är användbara för att exemplifiera typiska hydrologiska förhållanden under olika tidsperioder. I realiteten sker emellertid en konstant utveckling mellan klimattillstånden, och det går inte att urskilja några tydliga gränser mellan dem. Under ett tempererat tillstånd kan till exempel temperaturerna långsamt sjunka, så att områden med permafrosttillstånd långsamt utvecklas inom delar av regionen. Icke desto mindre kommer olika grundvattentyper att vara förhärskande på grund av de olika typerna av klimattillstånd och deras motsvarande hydrauliska förhållanden.

Därför innesluts grundvatten i klimatscenariot mellan två extrema grundvattentyper: Den "salina isfronten" och den "icke-salina smältzonen". Saltvattnet vid isfronten uppträder som följd av hydrauliska lyfteffekter. Utspätt smältvatten kan penetrera geosfären under vissa omständigheter som en konsekvens av högt hydrauliskt tryck under istäcket.

Några för geokemin viktiga frågor som behandlades i SR 97 kommer att prövas ytterligare i SR-Can:

- Inlandsis: hur snabb är dess tillväxt/avsmältning; varaktighet; tjocklek; kommer förvaret att befinna sig under en sub-glacial sjö?
- Hydrauliska förhållanden under inlandsis: penetrering av O<sub>2</sub>-rikt vatten; penetrering av utspätt smältvatten; uppressning av saltvatten.

- Permafrost: hur snabbt penetrerar den (kan saltvatten ackumuleras under den?); troligt djup och trolig varaktighet.

### **Plan**

Penetrering av utspätt vatten och uppspressning av saltvatten har beskrivits till exempel i SKB R-03-04. Dessa resultat kommer att ligga till grund för beräkningar av samverkan mellan vatten och berg inom HAG (den hydrogeokemiska analysgruppen inom SKB:s platsundersökningsprogram). Dessa modellberäkningar ligger utanför platsundersökningsuppgiften, men använder samma modelleringsverktyg som används för att etablera platsmodeller. Målet är att presentera en bedömning av huvudkomponenterna i glacialt smältvatten, som ska färdigställas under 2004. Resultaten ska även ligga till grund för beräkningar av penetreringsdjup för O<sub>2</sub>-vatten. Detta problem behandlades redan i SR 97, men ny information och nya numeriska program finns nu tillgängliga, varför frågan måste tas upp till ny behandling. Denna uppgift ska vara slutförd i slutet av 2004.

Frågan om ackumulering av fickor med hög salthalt under permafrosten kommer att behandlas med program som CONNECTFLOW eller DarcyTools. Detta kan behandlas samtidigt med penetreringshastigheten för permafrost. Modellering av detta problem kommer att inledas i början av 2004, med målet att avsluta studien i slutet av samma år.

### **5.5.5 Datamässiga och konceptuella osäkerheter i grundvattnets geokemi**

#### Beskrivning

Alla data är föremål för osäkerhet. Vissa beror på mätningar och kan vara statistiska eller systematiska. Dessa osäkerheter kan hanteras i form av uppskattningar från experter på respektive område. Inom området grundvattenkemi finns det tillkommande problemet med representativitet hos proven samt osäkerheter i modellerna av geosfär och hydrologi, vilka påverkar uppskattningen av provens representativitet.

Förutom dessa osäkerheter har beräkningsmodellerna som används i grundvattengeokemi ytterligare osäkerheter. Dessa beror på osäkerheterna i termodynamiska data, i antaganden av jämvikt, i modeller av sorption eller fasta lösningar etc.

### **Plan**

En workshop kommer att organiseras av SKB. Till den ska inbjudas experter på området, som ska diskutera hur man kan hantera osäkerheter inom detta område. Denna workshop kommer att hållas i början av 2004.

## 6 Närzonsfrågor

I detta kapitel diskuteras flera frågor med avseende på bränsle, kapsel, buffert och återfyllning. De första två avsnitten behandlar två allmänna närzonsfrågor, nämligen närzons-temperatur och inverkan av jordskalv på närzonen. Radionuklidtransportmodellering i närzonen diskuteras i kapitel 8, avsnitt 8.2.2. Radionuklidtransport i deponeringstunnlar diskuteras i avsnitt 5.3.1.

### 6.1 Närzonstemperatur

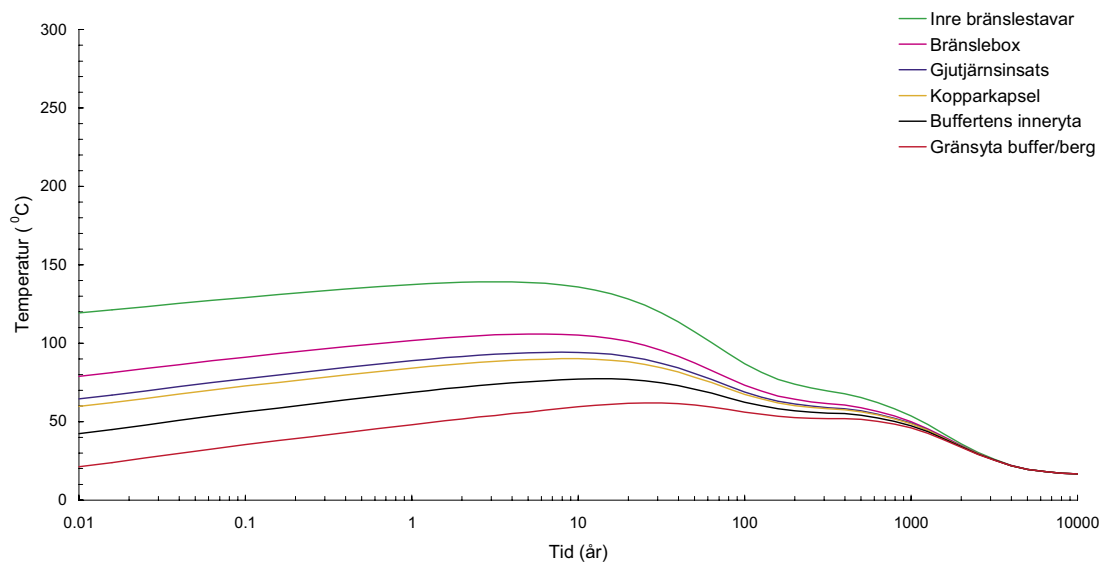
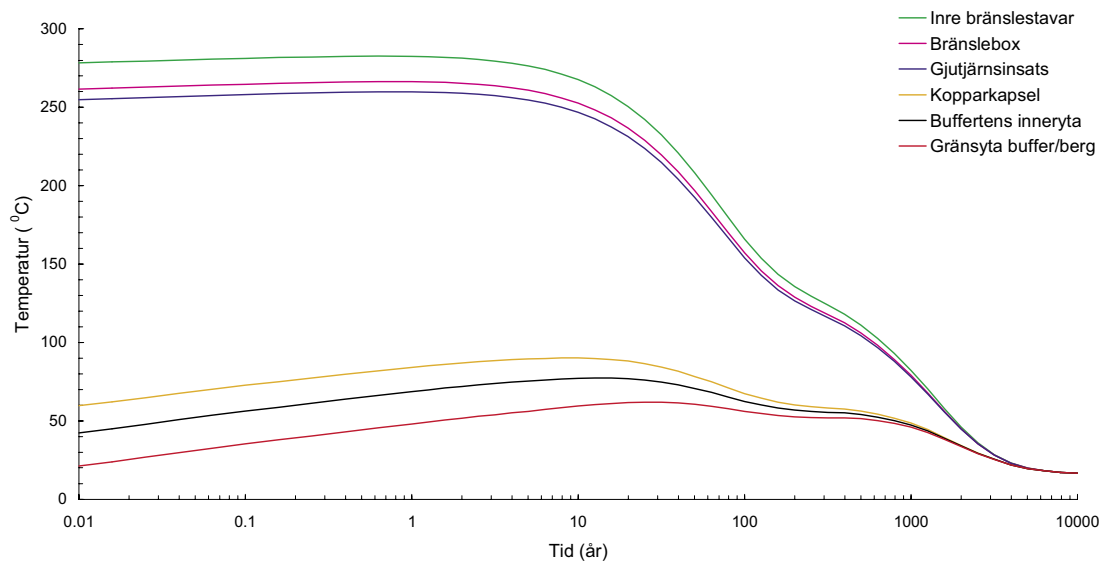
Den termiska utveckling av bränslet, kapseln, bufferten och närzonsberget beror på ett antal faktorer, varav de viktigaste är

- Bränslets resteffekt.
- Den termiska konduktiviteten hos kapselns inre, framför allt i spalten mellan kopparkapsel och gjutjärnsinsats, se figur 6-1.
- Emissiviteten hos kopparkapselns inre och yttre ytor.
- De termiska egenskaperna hos en eventuell spalt mellan kapsel och buffert, och, i mindre omfattning, mellan buffert och deponeringshålets väggar.
- De termiska egenskaperna hos buffert och berggrund.
- Avståndet mellan deponeringshålen.

Ett viktigt säkerhetsrelaterat krav anger att temperaturen på kapselns yta inte får överskrida 100°C, för att undvika anrikning av salt på kapselns yttertor. Salt skulle kunna medföra kemiska angrepp på kapseln som är svåra att förutsäga. Kraven uppfylls med ett tillräckligt stort avstånd mellan intilliggande kapslar i förvaret. I praktiken har målet satts till 90°C för att ta hänsyn till osäkerheter och inhomogeniteter i olika egenskaper som påverkar temperaturen.

Detaljanalyser av den termiska utvecklingen av kapselytor, buffert och närzonsberg kommer att göras inom ramen för förvarskonstruktionen, med hänsyn tagen till kraven enligt ovan.

I SKB:s nyligen framtagna systemmodell, avsnitt 8.1, har påvisats att resultaten av mera detaljerade termiska modeller för både buffert/berg-systemet och för kapseln och dess inre kan reproduceras väl. Figur 6-1 visar två exempel på beräkningar med denna modell. Modellen kommer att användas i SR-Can för att verifiera de beräkningar av kapselspridning som utförts av förvarskonstruktionsgruppen, för att studera känsligheten hos bränsle- och kapseltemperaturer för olika antaganden om spaltegenskaper som emissiviteter och gasvärmekonduktiviteter, för att uppskatta den termiska expansionen för gjutjärnsinsatsen och kopparkapseln, för att uppskatta bränsletemperatur etc.



**Figur 6-1.** Två exempel på möjlig termisk utveckling av olika komponenter i närzonen. Den övre figuren visar effekten av vakuum mellan gjutjärnsinsats och kopparkapsel. Den nedre visar utvecklingen för en gasfylld spalt mellan de båda komponenterna. Observera att alla komponenter utanför spalten, t ex kopparkapselns temperatur, är opåverkade av förhållandena i spalten.

## 6.2 Inverkan av jordskalv på närzonen

Effekterna på buffert, kopparhölje och gjutjärnsinsats av en jordskalvsinducerad skjuvrörelse hos en spricka som skär ett deponeringshål har nyligen modellerats /Börgesson et al, 2003/. Laboratorietest har genomförts för att fastställa relevanta materialegenskaper hos bufferten för den modellerade situationen.

Skjuvhastigheter upp till 1 m/s, buffertdensitet upp till 2,1 g/cm<sup>3</sup> och skjuvrörelser upp till 20 cm simuleras. Detta innebär att föreliggande studie är en mera realistisk representation än den som refereras till i t ex SR 97. Resultaten från studien visar att konsekvenserna av en skjuvrörelse tvärs ett deponeringshål i hög grad beror på bentonitens densitet, men även

på skjuvrörelsens position i förhållande till kapseln. En skjuvrörelse riktad mot mitten av kapseln är mindre allvarlig än en som är riktad mot en annan punkt. Inte i något av fallen förutses omedelbart haveri av gjutjärnsinsatsen eller kopparkapseln.

Studien visar spänning och plastiskt tillstånd hos kopparhöljet, insatsen och bufferten omedelbart efter skjuvrörelsen. Det återstår att kritiskt pröva om detta tillstånd skulle kunna leda till kapselbrott för någon typ av följdhändelser. En möjlig orsak till senare haveri skulle vara kryp i kopparkapseln som en följd av deformationer, orsakade av skjuvrörelsen. Även effekterna av framtida ökade isostatiska belastningar på kapslar påverkade av ett jordskalv ska beaktas. Övriga frågor gäller valet av realistiska materialegenskaper för gjutjärnsinsatsen och möjligen egenskaper hos bufferten i fall av cementering.

Uppenbarligen måste resultaten av denna studie integreras med resultat från snart färdigställda studier av jordskalvseffekter i geosfären, se avsnitt 5.1.5, för att fastställa vilka av de modellerade fallen ovan som är relevanta. Även den allmänna utveckling av bufferten behöver beaktas för att bedöma framtida buffertdensiteter.

## **6.3 Bränslefrågor**

Detta avsnitt behandlar några viktiga bränslefrågor i SR-Can. Med tiden kommer mycket av arbetet som skisseras nedan att sammanfattas i processrapporten för SR-Can.

### **6.3.1 Bränsleupplösning**

Osäkerheterna med avseende på bränsleupplösningshastigheten i en kapsel som antas vara skadad har stor inverkan på resultat av beräkningar av radionuklidutsläpp, transport och dos vid typiska förhållanden för ett KBS-3-förvar. I exemplet med en känslighetsanalys av sådana resultat från beräkningar baserade på SR 97-data, se avsnitt 2.9.5, är bränsleupplösningshastigheten den främsta osäkra parametern som resultaten är känsliga för. Denna fråga kräver stor uppmärksamhet i SR-Can.

En stor mängd nya experimentella data kring bränsleupplösning kommer från flera organisationer. Många studier fokuserar på effekter av vätgas, som förväntas förekomma på grund av korrosion av gjutjärn inuti en defekt kapsel. För att garantera en fullständig behandling av bränsleupplösningens frågan, med hänsyn tagen till all utveckling under senare tid, kommer en grupp av internationella experter inom detta område, på SKB:s initiativ, att ta fram en nulägesrapport om ett antal viktiga frågor som är relaterade till bränsleupplösning. En serie möten kommer att hållas under arbetets gång. Följande kapitelrubriker i rapporten föreslogs under det första planeringsmötet:

- Randvillkor.
- Bränsletillstånd efter 1 000 år.
- Information om bränsle som används i bränslelakningsexperiment.
- Diskussion om experimentella data.
- Granskning av bränsleupplösningssmodeller som tidigare använts av SKB, samt deras underlag.
- Modellering(ar) som ska användas i SR-Can.

I en bilaga ska diskuteras bränsleupplösningsmodeller som föreslagits av andra och som inte används av SKB.

En remissversion med rekommendationer för modellering av bränsleupplösning i SR-Can kommer att framläggas i slutet av 2003 och den slutliga rapporten ska publiceras våren 2004.

### **Ytterligare överväganden**

Det finns flera resultat med avseende på lakning av använt kärnbränsle och alfa-dopat  $UO_2$  (simulerar gammalt bränsle) i närvaro av olika mängder av upplöst vätgas. Alla data visar en stor inverkan av upplöst vätgas på lakning av använt kärnbränsle eller  $UO_2$ .

För att kunna använda dessa data behövs en beräkning av hastigheten för vätgasproduktion och diffusion utanför kapseln. En variation av parametrarna, som gjutjärnskorrosionshastigheter (dvs vätgasproduktionshastigheter), diffusionskoefficienter och kapseldefektmått skulle ge en serie vätgaskoncentrationer i grundvattnet inuti kapseln under olika tidsperioder. Sedan kan en vätgaseffektbaserad modell tillämpas för t ex  $[H_2]_{diss} > 10^{-3}$  M, motsvarande ett partialtryck för vätgas strax över 1 atm. Alternativ för modellering av detta fall är t ex: i) ingen nettoupplösning, dvs en löslighetsbegränsad modell, eller ii) en övre gräns för upplösningshastigheten som mätts upp under vätgasatmosfär, t ex  $10^{-8}$ /år.

När vätgaskoncentrationen understiger 1 mM bör man överväga en upplösningsmodell som är giltig för upplösning av 1 000 år gammalt använt kärnbränsle under påverkan av alfa-radiolys. Det finns inte mycket experimentella data för sådana förhållanden tillgängligt, men en del finns och bör granskas. Ett alternativ kunde vara att använda en upplösningshastighet på  $10^{-6}$ /år, som i en relativt nyligen genomfört EU-projekt /Grambow et al, 2000/.

### **6.3.2 Atermisk diffusion**

Fissionsprodukter migrerar genom diffusion i matrisen av använt kärnbränsle. Detta kräver höga temperaturer eller fissioner. Det finns endast ett experimentellt projekt /Matzke, 1983/ där temperaturoberoende diffusion av tunga atomer (som Pu och U) orsakad av klyvning har observerats under reaktorförhållanden. Den så kallade atermiska diffusionen är en process som har lagts fram på senare tid som möjlig i använt kärnbränsle på grund av alfa-sönderfallet, genom analogi med den atermiska diffusion som konstaterats i använt kärnbränsle på grund av fissioner. Denna atermiska diffusion, eller diffusion förstärkt av intern alfastrålning, antas vara relaterad till rörelser hos radionuklider inom gitterdefekter som ackumuleras genom alfasönderfallet) och som drivs av alfarekylen. Genom analogi med fissionsinducerad atermisk diffusion har atermiska diffusionskoefficienter för alfa-inducerad diffusion uppskattats vara proportionella mot antalet skapade defekter och energin hos de rekylade kärnorna. Dessa uppskattningar är synnerligen approximativa och sträcker sig över några storleksordningar. Den slutligt beräknade effekten är en ökning av korngränsfraktionen med upp till 30 procent av det totala inventariet efter 10 000 år, med konsekvenser även för bränslekornkohesion.

Med tanke på betydelsen av de prognostiserade konsekvenserna ska processen beaktas i SR-Can. Ytterligare diskussion om hantering av denna fråga i SR-Can finns i nulägesrapporten under framtagning, se avsnitt 6.3.1.



### 6.3.3 Kolloidbildning

En intakt buffert är ett effektivt kolloidfilter. Om bufferten skulle påverkas kan dock kolloider tränga ut ur kapseln och potentiellt utgöra vektorer för radionuklidtransport i berg. Möjligheten av kolloidbildning inuti kapseln fordrar därför viss uppmärksamhet.

#### ***Kolloider från upplösta radionuklider***

I några nyligen genomförda studier /Knopp, 2000; Neck och Kim, 1999/ har lösligheten hos fyrvärda aktinidoxider som t ex Th(IV)-oxid fastställts vid det pH-värde där bildning av oxidkolloider detekteras. Detta betyder att de ofta diskuterade inneboende kolloiderna i aktinid(IV)-oxid inte kan bildas i undermättade lösningar, dvs i laktlösningar med använt kärnbränsle, som har extremt låga koncentrationer av upplösta aktinid(IV)-joner. Löslighetsmätningar visar även att den solida fasen i jämvikt med lösningen, vid neutralt pH-värde, motsvarar en mindre kristallin fas med högre löslighet än vid  $\text{pH} < 4$ . För att nå övermättad med en sådan oxidfas skulle ännu mera lösliga aktinidjonkoncentrationer behövas.

Preliminärt förefaller det rimligt att utesluta denna mekanism för kolloidbildning under sådana förhållanden som kan förväntas inuti en defekt kapsel i ett djupförvar.

#### ***Bildning av Fe(III)-kolloider***

En annan möjlighet är bildning av Fe(III)-hydroxidkolloidpartiklar genom oxidation av Fe(II)-joner som har sitt ursprung i upplösning av gjutjärnsinsatsen på grund av radiolytiska oxidanter. Så som diskuteras ovan är det sannolikt att den upplösta vätgas som produceras i behållaren genom anjonisk järnkorrosion skulle förbruka radiolytiska oxidanter lättare än Fe(II).

Möjligheten av Fe(III)-kolloidbildning diskuteras ytterligare i nulägesrapporten om bränsle, se avsnitt 6.3.1.

#### ***Bildning av bränslekolloider***

Bildning av bränslekolloider från korn av använt kärnbränsle diskuteras i processrapporten för SR 97, avsnitt 2.7.8. Det finns för närvarande ingen information utöver den som presenteras i SR 97.

### 6.3.4 Radionuklidinventarier för SR-Can

Radionuklidinventariet som används i SR 97 kommer att uppdateras. Beräknade värden är rimliga, men en bättre diskussion kring osäkerheter fordras. Även beroendet av bränsletypen behöver utredas ytterligare. Vissa observerade skillnader mellan SR 97-beräkningarna och resultat rapporterade av Nagra måste förklaras.

Behandlingen av fraktionen omedelbart tillgängliga nuklider, IRF, i SR-Can ska vara samma som i SR 97. Information från nyligen genomförda studier kommer att läggas till data-uppsättningen. Högutbränt bränsle är ett område som kan kräva speciell uppmärksamhet.

SR-Can-inventariet kommer att föreslås i september 2003, tillsammans med en plan för att ytterligare förbättra föreslagna data.

### 6.3.5 Radionuklidkemi i SR-Can

Strukturen hos bakgrundsrapporten om lösligheter för SR 97 /Bruno et al, 1997/ är användbar även för SR-Can. Områdena som behöver större omarbetningar är:

- Definitionen av referensvatten och utveckling över tiden. Vilka grundvattenförhållanden kan förväntas i förvaret? Detta område kräver integration med den kemiska modelleringen av porvattnet i bufferten.
- En bättre definition av ”bästa uppskattade” och ”pessimistiska” löslighetsvärden. Dessa definitioner presenterades i SR 97 efter att löslighetsrapporten hade avslutats, och värdena valdes något godtyckligt.
- Vikten av korrosion av järninsatserna försumrades nästan i löslighetsberäkningarna i SR 97. Detta kan pressa redoxförhållanden till mycket låga värden.
- Det finns idag en mycket bättre förståelse av aktinidkemin. Detta måste beaktas i rapporten.

En rapport om radionuklidlösligheter för SR-Can (förhållandena vid Forsmark) ska läggas fram i slutet av januari 2004, förutsatt att sammansättningen av referensvatten för Forsmark kan levereras som indata till projektet senast i september 2003. Osäkerheterna i levererade lösligheter kommer att diskuteras i rapporten i enlighet med den allmänna planen för hantering av dataosäkerheter som skisseras i avsnitt 2.11.

### 6.3.6 Kapslingsrörintegritet

Den vetenskapliga basen för att betrakta kapslingsröret som en barriär mot radionuklidutsläpp vid det föreslagna Yucca Mountain-förvaret har granskats av /Ahn et al, 1999/. Som mekaniska orsaker för kapslingsrörhaveri identifierar de fallande sten, kryp samt splittring på grund av att kärnbränslematrisen oxiderar. Som andra mekanismer listar de korrosion och fördröjt brott på grund av väteförspredning (DHC – delayed hydrogen cracking) och haveri före deponering på grund av skador under hantering. Risken för fallande sten är eliminerad i ett KBS-3-förvar eftersom denna typ av förvar är återfyllt, till skillnad mot det föreslagna Yucca Mountain-förvaret. Inte heller kommer det att uppstå splittring på grund av oxidering av använt kärnbränsle, eftersom tillgången på syre är ytterst begränsad i ett förslutet KBS-3-förvar. Återstående identifierade mekanismer för kapslingsrörhaveri i ett förvar av typ KBS-3 är kryphaveri, väteförspredning och haveri på grund av skador under hantering.

Kryphaveri kräver höga kapslingsrörstemperaturer. Vid torrlagring av använt kärnbränsle sätts den övre gränsen för säkerhet mot kryphaveri till 410°C (Tyskland) och 380°C (USA). Enligt Ahn är kryphaveri osannolikt under förvarsförhållanden, men om kapslingsrörstemperaturen stiger över ~350°C kan upp till 5 procent av kapslingsrören haverera.

DHC är en sprickutbredningsprocess under tillåtna belastningsförhållanden. Den beror på vätgasdiffusion till sprickspetsen, följd av bildning och sprickning av hydrider. Efter bestrålning har kapslingsrören av zirkaloy hydrider längs sin omkrets. Detta har liten betydelse för haveririsken. Hög temperatur (vid 300°C förväntas hydriderna lösas upp i zirkonmatrisen) följt av långsam kylning kan leda till återutfällning av radiella hydrider med ökad risk för kapslingsrörshaveri, särskilt eftersom spänningen i kapslingsröret ökar med tiden på grund av alfassönderfall /Ahn et al, 1999/.

Efter kapselbrott är korrosionsprocesser också tänkbara. Den allmänna korrosionshastigheten för zirkaloy är så långsam (cirka 2 nm/år /Rothman, 1984/) att genombrott på grund

av korrosion inte beräknas uppträda förrän efter 400 000 år. Alla andra mekanismer, inklusive lokaliserad korrosion och spänningskorrosionssprickbildning, leder endast till lokalt haveri (dvs hål och sprickor) i ett annars relativt intakt zirkaloy-kapslingsrör. Med tanke på svårigheten att bedöma sannolikheterna för var och en av dessa mekanismer, kan i säkerhetsanalysen förutsättas att zirkaloy-kapslingsröret är närvarande under lång tid, men att det inte kommer att hindra vatten från att nå bränslet på grund av lokala haverier i kapslingsröret. Det bör emellertid påpekas att förutom initialt havererade kapslingsrör och haverier orsakade av transportskador tar det lång tid att utveckla kryphaveri och DHC – även om det är svårt att förutsäga exakt hur lång tid.

### 6.3.7 Kriticitet

Kriticitets säkerheten i ett djupförvar har analyserats av /Agrenius, 2002/. Agrenius kriticitetsberäkningar visar att utgående från moderna metoder och en rimlig bedömning av osäkerheterna, är utbränningskreditering ett möjligt sätt att påvisa kontrollen av reaktiviteten i kapslar med en minimal uppsättning av nuklider. Extra aktinider och utvalda fissionsprodukter ger bredare marginaler. Det finns därför för närvarande inget behov av mera data inom detta område.

Resultaten kommer att diskuteras i processrapporten för SR-Can.

## 6.4 Kapselfrågor

SKB:s referenskapsel består av en inre behållare av gjutjärn och ett hölje av koppar. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön. Kopparhöljet är 5 cm tjockt och kapseln har formen av en cirka 4,8 meter hög cylinder med en diameter av 1,05 meter.

Insatsen har kanaler där bränsleelementen placeras och finns i två utformningar; en för 12 BWR-element och en för 4 PWR-element. Bränslekanalerna tillverkas i form av en kassett av kvadratiska rör. Därefter tillverkas innerbehållarens väggar och botten genom att kringgjuta kassetten med nodulärt gjutjärn.

Det finns flera alternativ för tillverkning av kopparkapslar, t ex extrusion eller smidning för att tillverka sömlösa rör. En annan möjlighet är att tillämpa pressning och dragning för att tillverka rör med integrerad botten. I fall när en botten måste monteras kan detta utföras genom svetsning, med samma metoder och testningstekniker som för förslutningssvetsen.

Efter att bränslet har placerats i kapseln försluts insatsen med ett O-ringtätat lock som fixeras med en bult. En O-ring behöves emellertid om vakuumsvetsningsteknik används. Kopparhöljets lock monteras genom svetsning och svetsens kvalitet kontrolleras med icke förstörande provning (OFP). Kapseln väger totalt cirka 25 ton då den är fylld med använt kärnbränsle. En kapsel rymmer cirka två ton bränsle. Totalt kommer cirka 4 500 kapslar att tillverkas enligt dagens uppskattningar.

En kritisk del av inkapslingsprocessen är förslutningen av kapselns lock. De svetsmetoder som har utvecklats är elektronstrålesvetsning (EBW) och friktionssvetsning (FSW). Båda dessa metoder utvecklas parallellt och en kommer att väljas under 2005 för vidare utveckling och användning i inkapslingsanläggningen.

## 6.4.1 Initiala kapseldefekter

Den möjliga förekomsten av initiala kapseldefekter är en grundläggande fråga i bestämningen av initiala tillstånd för förvaret. Detta gäller alla förslutningar i kapseln och i synnerhet lockförslutningen, eftersom denna är svårare att inspektera än de förslutningar som utförts tidigare i processen.

För att hantera situationen kvantitativt har två uppsättningar krav etablerats. En är acceptansspecifikationer för förslutningssvetsen, som i huvudsak specificerar när en förslutning ska betraktas som defekt. Den andra är konstruktionskriterier för kapselproduktionsprocessen, som specificerar en maximalt tillåten andel kapslar med oupptäckta defekta förslutningar som tillåts lämna inkapslingsanläggningen.

Acceptansspecifikationerna för förslutningssvetsen på 50 mm tjocka kapslar anger att största tillåtna avvikelse är 35 mm i radiell riktning, dvs det ska finnas minst 15 mm intakt material i svetsfogen. Korrosionsbedömningen visar att detta, under förutsedda förvarsförhållanden, säkerställer kapslarnas isolerande förmåga i minst 100 000 år och med största sannolikhet miljontals år.

Konstruktionskriterierna för kapselproduktionsprocessen anger att kapslar måste vara förslutna och inspekterade med metoder som garanterar att maximalt 0,1 procent av de färdiga kapslarna innehåller defekter större än vad som anges i acceptansspecifikationerna, dvs att maximalt en kapsel per tusen får lämna inkapslingsanläggningen med mindre än 15 mm intakt material någonstans i svetsfogen.

Konstruktionskriterierna används för att definiera mål för tillverkningsprocessen för kapslar och denna process återstår att etablera och kvalificera. Tillverkningsprocessen kommer att innefatta flera kvalitetskontrollsteg, i synnerhet OFP-metoder för förslutningssvetsarna, som röntgen- och ultraljudstest.

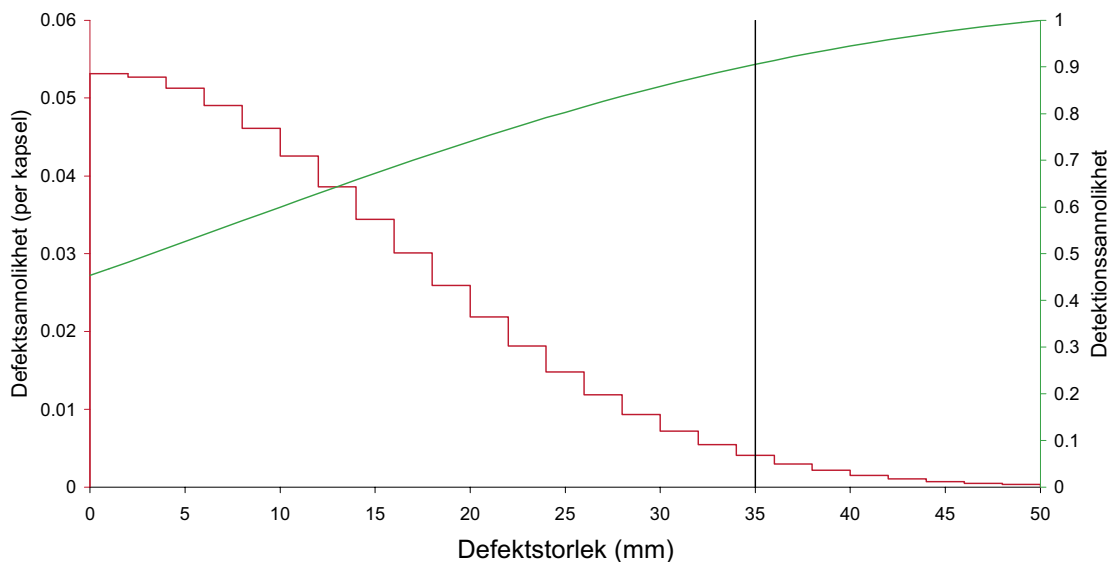
Acceptansspecifikationer och konstruktionskriterier fungerar därför i huvudsak som mål vid etablering av tillverkningsprocessen. Faktiska prestanda hos tillverkningsprocessen måste emellertid påvisas kvantitativt. Två viktiga faktorer i denna demonstration är

- den faktiska kvaliteten hos svetsssystemet, dvs frekvensen av defekter av olika storlekar i producerade svetsfogar,
- den faktiska tillförlitligheten hos det icke-förstörande provningssystemet, dvs sannolikheten att provningssystemet detekterar defekter av olika storlekar.

Kvaliteten hos svetsssystemet fastställs genom att tillämpa flera förstörande och icke förstörande testmetoder på en testserie, och sedan utvärdera resultaten statistiskt. Metodiken för detta är under utveckling.

Tillförlitligheten hos OFP-systemet fastställs framför allt genom att låta ett antal kända defekter passera systemet. För att tillhandahålla relevanta defekter för studien kommer ingångsparametrarna för svetsprocesserna att varieras utanför normalt område. Analysen tar hänsyn till de olika testmetoderna och varje metod, liksom kombinationer av dessa, kommer att analyseras.

Etableringen av tillförlitlighet för OFP och kvaliteten hos svetsssystemet förväntas vara färdigställda under 2005 för båda svetsmetoderna, FSW och EBW. Det primära resultatet av projektet kommer att vara en kurva för så kallad detekterings sannolikhet (POD – probability of detection) som uttrycker sannolikheten för detektering av en defekt som funktion av defektens storlek. Figur 6-2 visar ett exempel på en POD-kurva (den gröna kurvan).



**Figur 6-2.** POD för OFP-systemet (grön), sannolikheten för produktionsdefekter som funktion av storlek (röd, med referens till en enstaka kapselförslutning) och acceptanskriteriet (svart vertikal linje).

Dessutom visas acceptanskriteriet (35 mm i detta hypotetiska fall) och en kurva för sannolikheten av produktionsdefekter som funktion av storleken (den röda kurvan). Figuren visar en gynnsam situation där i) sannolikheten för detektering av defekter större än acceptanskriteriet är hög (mellan 90 och 100 procent) och där ii) sannolikheten för produktionsdefekter större än acceptanskriteriet är låg (under 0,4 procent). I denna hypotetiska situation kan slutsatsen dras från detaljer i de båda kurvorna att sannolikheten för att leverera en kapsel med en odetekterad defekt större än acceptanskriteriet är omkring  $10^{-4}$ . Detta system skulle alltså uppfylla ett konstruktionskriterium som anger att sannolikheten för leverans av en sådan kapsel ska understiga  $10^{-3}$ . Lägg även märke till att diskussionen ovan är förenklad och inte inkluderar t ex effekter av potentiell ansamling av små defekter.

När kvaliteten hos svetsystemet och tillförlitligheten hos OFP-systemet har fastställts på ett tillfredsställande sätt kan de kombineras för att ta fram antaganden med avseende på frekvensen av odetekterade svetsdefekter för hela uppsättningen kapslar som ska deponeras i förvaret.

### **Indata för SR-Can**

En dialog med projektet som beskrivs ovan kommer att upprätthållas under SR-Can-projektet för att följa framstegen och för att kontrollera att resultaten ges i ett lämpligt format för att kunna fungera som indata till säkerhetsanalysen. Om användbara data presenteras i tid för slutförandet av SR-Can kommer dessa att användas som indata till säkerhetsanalysen. Tills sådana data finns tillgängliga kan man på försök anta att konstruktionskriterier precis uppfylls av tillverkningsprocessen. Detta skulle alltså innebära att i genomsnitt en deponerad kapsel på tusen kommer att ha svetsdefekter som består i svetsfogar med mindre än 15 mm intakt material. Det faktiska antalet defekta kapslar kan förutsättas vara en binomialfördelning med ett genomsnitt på  $10^{-3}$  gånger antalet deponerade kapslar. Detta har gjorts i t ex /Hedin, 2002b/ och har senare även nämnts av /Hora, 2002/ som en möjlig väg att hantera situationen.

## 6.4.2 Den vidare utvecklingen av defekta förslutningar

Det är troligt att även kapslar som inte uppfyller acceptanskriterierna kommer att isolera under mycket lång tid. Ett tidigt haveri kan emellertid inte uteslutas. Typen och formen hos en sådan defekt som förblir oupptäckt är omöjlig att fastställa. Erfarenheterna hittills från kapsellaboratoriet ger emellertid visst underlag för välgrundade antaganden.

/Ronneteg, 2001/ har gjort en omfattande analys av 43 diskontinuiteter i elektronstråle-svetsar och har jämfört resultaten från digital röntgen- och ultraljudsundersökning med mikroskopundersökning av diskontinuiteterna. De flesta av diskontinuiteterna är relativt små, mindre än 10 mm i radiell riktning och med högst frekvens för storleken 3–5 mm. Utsträckningen i omkretsens riktning uppgår vanligtvis bara till några få millimeter. Eftersom detekterbarheten förväntas vara bättre för de största diskontinuiteterna är det rimligt att anta att de diskontinuiteter som förblir odetekterade är relativt små. En rad relativt små diskontinuiteter, ett fåtal millimeter per styck, separerade endast av ett tunt materialskikt, förefaller vara den rimligaste orsaken till tidiga kapselbrott. Sannolikheten för detta torde emellertid vara mycket liten.

Anta till exempel att svetsen innehåller en stor detekterad diskontinuitet, nära den största acceptabla storleken, men även flera mindre, odetekterade, diskontinuiteter. Detta skulle kunna vara t ex, en 35 mm-por och tre 4 mm-porer. Därmed skulle svetsen ha cirka 3 mm intakt material. I detta scenario förekommer ingen initial defekt med fullständig penetrering. I LOT-experimentet /Karnland et al, 2000/ uppmättes den kortvariga korrosionshastigheten till cirka 3 µm per år under perioden med tillgång till syre. Om man, mycket pessimistiskt, förutsätter att denna korrosionshastighet skulle råda under en längre period skulle penetrering inträffa efter 1 000 år. I elektrokemiska mätningar inom ramen för LOT-experimentet, uppskattades korrosionshastigheten några få år efter nedgrävning till 0,7 µm per år. Detta skulle innebära penetrering efter cirka 4 000 år. I de livslängdsförutsägelser som citeras av /King et al, 2001/ sträcker sig försiktiga uppskattningar för korrosionsdjup efter en miljon år från 1,3 mm till 18 mm, dvs 3 mm material skulle ge en livslängd över 100 000 år. Även med mycket pessimistiska antaganden bör det inte vara någon sannolikhet för defekter med fullständig penetrering efter kortare tid än 1 000 år. Det återstår att utveckla diskussionen ovan så att vidare utveckling av defekta förslutningar kan behandlas på ett konsistent och försvarbart sätt i SR-Can.

## 6.4.3 Intern utveckling av skadad kapsel

Den interna utvecklingen av en kapsel med en penetreringsdefekt beror på flera faktorer, som defektens storlek, grundvattentryck, intern kapselgeometri, gjutjärnskorrosion etc. Flera av dessa faktorer är behäftade med betydande osäkerheter. Följande är *ett* exempel på en tänkbar utveckling, förutsatt ett hål med 4 mm diameter i kopparhöljet.

Så snart kopparkapseln har penetrerats kan vatten tränga in. Inträngningshastigheten för vatten bestäms av tryckskillnaden mellan fjärrzonen och kapselns inre eftersom flödesresistansen för hålet är mycket mindre än flödesresistansen för bentonit /Bond et al, 1997; Takase et al, 1999/. Vid en tryckskillnad på 4,9 MPa, motsvarande 5 MPa hydrostatiskt tryck i fjärrzonen och 0,1 MPa tryck i kapseln, är vatteninflödeshastigheten  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup> per år för ett 4 mm hål.

Hastigheten för anaerob korrosion av gjutjärn förväntas understiga 0,1 µm per år, motsvarande en vätgasproduktionshastighet på cirka 0,2 dm<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> och år /Smart et al, 2002b/. En tänkbar galvanisk accelererande faktor på grund av kopplingen gjutjärn-koppar kan på sin

höjd fördubbla denna hastighet. Även om korrosionen uppträder över hela gjutjärnsområdet (omkring 14,4 m<sup>2</sup>), är denna korrosionshastighet för låg för att förbruka allt vatten som trängt in initialt. Konsekvensen är att det ringformade utrymmet långsamt fylls med vatten, samtidigt som vätgasstrycket inuti kapseln ökar, och därmed bromsar inträngningen av vatten. Mera detaljerade beräkningar, utförda av både /Bond et al, 1997/ och /Takase et al, 1999/ visar att i detta scenario kommer förbrukningen av vatten på grund av korrosion att överskrida vatteninflödet efter cirka 300 år och att allt vatten har eliminerats efter cirka 600 år. Efter denna tid orsakas korrosion endast av vattenånga, vilket innebär att det inte förekommer någon galvanisk ökning av korrosionshastigheten. Korrosionen kommer då även att vara jämnt fördelad över hela insatsområdet. Tiden för att fylla det ringformade utrymmet med magnetit uppgår till mellan 10 000 och 20 000 år, beroende på tillverknings-toleranserna för insatsen och kopparkapseln /Takase et al, 1999/.

Den mest sannolika utvecklingen efter att det ringformade utrymmet har fyllts med magnetit är att korrosionshastigheten sjunker till i princip noll. Experimentella studier vid Serco ger ingen indikering av att fortsatt korrosion har lett till stora krafter orsakade av tillväxt av korrosionsprodukter /Smart et al, 2001/. Inte heller analoga studier stöder en sådan utveckling /Smart et al, 2003/.

Om vi skulle anta att korrosion av vattenånga, av något skäl, skulle ha förmågan att sprida sig till insatsens hela yta efter att det ringformade utrymmet har fyllts skulle detta leda till en långsam försämring av kapselns mekaniska stabilitet. Efter 50 000 till 100 000 år skulle insatsen kollapsa under det tillkommande trycket från en nedisning. Därefter skulle det finnas en kontinuerlig vattenkanal från bränslet till närzonen.

I varje situation där kapseln antas vara delvis eller helt fylld med vatten är det viktigt att bedöma vätgasens partialtryck. Så som diskuteras i avsnitt 6.3.1, kommer hastigheten hos bränsleupplösning i en vattenfylld kapsel troligen att vara starkt beroende av denna storhet.

Som nämnts är ovanstående bara några få av flera tänkbara interna utvecklingar av kapslar med penetrerande defekter. Till exempel måste även utsläpp av vätgas från kapseln genom bufferten och ökande grundvattentryck under en nedisning beaktas i en mera utvecklade diskussion. Området måste utvärderas noggrant, så att försvarbara antaganden för t ex radionuklidtransportmodellering kan formuleras i SR-Can.

#### **6.4.4 Isostatisk kollapsbelastning**

Ett projekt kring probabilistisk analys av mekanisk stabilitet hos deponeringskapslar under isostatisk belastning har inletts. Projektet omfattar mekanisk provning av gjutjärnsinsatser, probabilistisk analys av kapselstabilitet baserad på data erhållna från den mekaniska provningen och från mekanisk provning av modellkapslar för modellvalidering. Resultat från projektet kommer att vara tillgängligt för SR-Can i slutet av 2003 eller början av 2004. Det kan därmed förväntas att projektet resulterar i isostatiska kollapsbelastningar för BWR- och PWR-insatser för realistiska materialegenskaper och även en genomlysande diskussion av osäkerheterna som påverkar resultaten.

#### **6.4.5 Korrosion**

Både kopparkorrosion och, i fall av defekta kopparkapslar, anaerob järnkorrosion är avgörande processer i förvarets utveckling.

## **Kopparkorrosion**

I /King et al, 2001/ visas att även om mycket ny information och data kring kopparkorrosion har samlats in under de senaste tjugo åren har ingenting upptäckts som har stor inverkan på utvecklingen av korrosionsangreppet på kopparkapseln. Det som har framkommit snarare stöder tidigare analyser än motsäger dem. Därför kommer behandlingen av kopparkorrosion i stort sett att vara densamma som i SR 97.

Som en del av de preliminära analyserna av SR-Can (avsnitt 2.9) kommer ett antal gränssättande beräkningar med avseende på kopparkorrosion att göras med hjälp av den nyutvecklade systemmodellen (avsnitt 8.1). Syftet är att sätta i perspektiv frågor som korrosion på grund av syre från glacialt smältvatten eller på grund av sulfid producerad av sulfatreducerande bakterier. Även effekterna av statistisk variation av flödes hastigheter vid förvarsdjup, betydelsen av bufferten som en barriär mot advektiv transport och betydelsen av pyrit som reducerande ämne i bufferten kommer att analyseras i perspektivet kopparkorrosion.

## **Anaerob järnkorrosion**

Efter SR 97 har mera data om anaerob korrosion av järn samlats in och analyserats. Resultaten har även publicerats i en expertgranskad vetenskaplig tidskrift /Smart et al, 2002a,b/. Insamlade data stöder de korrosions hastigheter som används i SR 97 och ett liknande angreppssätt på bedömning av järnkorrosion kommer därför att användas i SR-Can.

## **6.5 Buffert- och återfyllningsfrågor**

### **6.5.1 Inledning**

Två olika buffertmaterial och tre olika återfyllningskoncept kommer att analyseras i SR-Can. Tillgängliga och snart färdigställda experimentella data om materialegenskaper ska sammanställas och användas i analyser av buffert- och återfyllningsutveckling, först för ett antal stiliserade situationer och senare i projektet för analyser av de valda scenarierna.

Det finns många säkerhetsrelaterade egenskaper för buffert och återfyllning som behöver utvärderas som funktion av tid i analysen av djupförvarets utveckling. För bufferten är de viktigaste egenskaperna dess densitet och hydrauliska konduktivitet som i sin tur kräver ett visst svälltryck. För återfyllningens hydrauliska konduktivitet fordras ett visst svälltryck, och dess kompressionsegenskaper, särskilt kompressionsmodulen, spelar nyckelroller för säkerheten. Alla dessa egenskaper är emellertid mer eller mindre sammanlänkade genom inneboende egenskaper för det valda materialet. För ett givet material kommer krav på en fysisk egenskap att leda till restriktioner även för de övriga.

Både bufferten och återfyllningen kommer att genomgå en relativt snabb (några tiotal till hundratal år) hydraulisk mättnadsfas. I slutet av denna inträder ett visst mått av svällning hos bufferten och en därav följande kompression av återfyllningen kan förväntas. Efter denna fas kommer den långsiktiga utvecklingen i huvudsak att orsakas av kemiska processer när buffertens och återfyllningens fasta faser reagerar med ämnen i grundvattnet. Dessa processer är emellertid, framför allt då det gäller bufferten, mycket långsamma på grund av den begränsade grundvattenomsättningen och förhållandet att diffusion är den dominerande transportprocessen.



Det allmänna angreppssättet på studier av buffertens och återfyllningens utveckling är att utvärdera mättnadsfasen i separata modellberäkningar som framför allt ger buffertens och återfyllningens densitet och svälltryck efter mättnad, och sedan analysera den långsiktiga kemiska utvecklingen för beräknad densitet.

De viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna som nämns ovan går generellt sett inte att hämta direkt från modelleringen, utan måste beräknas via kända empiriska relationer mellan modellerade egenskaper och säkerhetsrelaterade storheter. Detta är t ex fallet för buffertsvälltryck, som fastställs via empiriska relationer utgående från buffertdensitet, och porvattensammansättning, särskilt dess jonstyrka. Buffertens hydrauliska konduktivitet fastställs från densitet, temperatur, jonstyrka och adsorberade radionuklider. Återfyllningens kompressionsmodul fastställs i första hand utgående från densiteten, medan återfyllningens hydrauliska konduktivitet är starkt beroende av ett visst minsta svälltryck för att garantera homogeniteten, och även på densitet, adsorberade radionuklider och temperatur.

Följande är en kortfattad översikt av några grundläggande frågor och en plan för deras hantering i SR-Can.

### **6.5.2 Val av buffert och återfyllningsmaterial som ska analyseras**

För bufferten kommer en naturligt förekommande natriumbentonit från Wyoming (Mx-80) och en kalciumbentonit från Milos att användas i SR-Can. Båda dessa material är väl karakteriserade sett till sammansättning och uppdaterade rapporter kommer att läggas fram i september 2003 för Mx-80-leran och i oktober 2003 för Milos-leran.

Tre återfyllningskoncept kommer att analyseras i SR-Can:

1. En 30/70 procent (torrvikt) homogen blandning av vald buffertbentonit och krossat berg, kompakterad till en realistisk densitet med dagens teknik.
2. 30/70 procent (torrvikt) skiktade lager av vald buffertbentonit och krossat berg.
3. En svällande lera; antingen den valda buffertbentoniten eller Friedland-lera, med en densitet som återstår att fastställa i enlighet med dagens packningsteknik.

I det tredje fallet betraktas inte MX-80 som ett kostnadseffektivt alternativ. Det har tagits med därför att det utgör en väl karakteriserad representant för natriumbentoniter.

En sammanställning av tillgängliga data för Friedland-leran (materialsammansättning och fysiska materialegenskaper) kommer att läggas fram i september 2003.

Det är uppenbart att antalet möjliga kombinationer av buffertmaterial och återfyllningskoncept som antyds ovan är stort och att troligen ett litet antal representativa kombinationer måste väljas t ex i definitionerna av scenarier för att hålla antalet varianter i analysen hanterbart.

### **6.5.3 Tillgängliga och tillkommande data om fysiska materialegenskaper**

Flera materialtest på Wyoming- och Milos-leror ska genomföras under 2003 och rapporteras vid årets slut. Svälltryck och hydrauliska konduktiviteter för de båda materialen ska fastställas för kombinationer av lerdensitet mellan 1,5 och 2,2 g/cm<sup>3</sup> vid mättnad och salthalt upp till 1 M. Alla dessa kombinationer ska studeras för såväl natrium- som kalciumkatjoner,

vilket innebär att effekter av kompletta jonbytesförlopp för en naturligt förekommande natriumbentonit från Wyoming till ett kalciumtillstånd respektive från kalciumbentonit från Milos till ett natriumtillstånd ska undersökas. Experimenten ska ge empiriska data om

- buffertens hydrauliska konduktivitet som funktion av densitet och jonstyrka (både  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{Na}^+$ ),
- buffertens svälltryck som funktion av densitet och jonstyrka (både  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{Na}^+$ ).

Då det gäller de viktigaste återfyllningsegenskaperna, den hydrauliska konduktiviteten och kompressionsmodulen kan i allmänhet följande konstateras:

- För koncepten svällande lera och bentonitskikten i det skiktade konceptet erhålls hydrauliska konduktiviteter och svälltryck från samma uppsättning data som motsvarande buffertmaterial.
- Den hydrauliska konduktiviteten och svälltrycket hos en välhomogeniserad blandning av bentonit och krossat berg, erhålls genom att tillämpa relationerna ovan på värden som motsvarar samma montmorillonitdensitet som den för blandningens lerkomponent. För mindre väl homogeniserade blandningar måste relationerna användas med försiktighet.
- Återfyllningens kompressionsmodul beror på densiteten snarare än på dess kemiska tillstånd.

Inom ett pågående återfyllningsprojekt hos SKB sammanställs tillgängliga återfyllningsdata för valda koncept och de ska senare utvärderas mot empiriska förhållanden som ska ges av ovan beskrivna arbete. Sammanställda data ska bedömas inom SR-Can-projektet och återkopplas till återfyllningsprojektet för att klargöra om data är tillfredsställande eller om ytterligare undersökningar krävs.

### **Att förstå de empiriska förhållandena**

En osmosbaserad modell som beskriver svälltrycket med givna data för katjonbyteskapacitet, buffertdensitet och porvattnets jonstyrka finns tillgänglig /Karlund et al, 2002/ och utvecklas ytterligare. Referens görs till modellen i SR-Can-processrapporten och den används i systemmodellen, se avsnitt 8.1.

Det finns ingen entydig och detaljerad förståelse för hur de hydrauliska konduktiviteterna i lermaterial beror på materialegenskaperna. Detta är föremål för ett pågående forskningsprojekt inom SKB, med titeln "Physical properties, correlation between mineralogy and swelling pressure/hydraulic conductivity (Fysiska egenskaper, korrelation mellan mineralogi och svälltryck/hydraulisk konduktivitet)" (Clay Technology AB).

Förståelsen för hur kompressionsmodulen hos återfyllningsmaterialet beror på dess materialegenskaper är relativt god.

## **6.5.4 Initial termohydromekanisk modellering av buffert och återfyllning**

Varken bufferten eller återfyllningen är helt vattenmättade när de deponeras i förvaret. När grundvatten kommer i kontakt med bufferten och återfyllningen når dessa efter hand full vattenmättnad och med tiden förväntas ett svälltryck uppstå när ytterligare vattenabsorption förhindras av omgivande berg. Svälltrycket som utvecklas i bufferten är högre än det i återfyllningen, vilket resulterar i en expansion uppåt av bufferten och en motsvarande

kompression av återfyllningen. Detta resulterar i minskad buffertdensitet, vilket måste kvantifieras i säkerhetsanalysen.

Den initiala mättnadsfasen för bufferten och resulterande svällning modellerades i SR 97 för ett antal parameterkombinationer. Modelleringsfallen kommer att granskas och ytterligare fall, inkluderande även mättnad av återfyllning, kommer att modelleras. Ett sådant fall beaktar mättnad av buffert med vatten som tillförs genom återfyllning, vilket simulerar ett deponeringshål utan vatteninflöde.

En plan för modelleringen ska etableras och föras in i SR-Can-tidplanen i augusti 2003.

I det slutliga tillståndet av den initiala termohydromekaniska modelleringen balanseras buffertens svällningstendenser både genom kompression av återfyllningen och av friktion mot deponeringshålet. Sistnämnda effekt skulle emellertid delvis kunna neutraliseras av långsiktigt kryp hos buffertmaterial, vilket ger upphov till tillkommande svällning av bufferten och därmed ytterligare minskning av buffertdensiteten. Denna effekt kan bedömas med t ex en gränssättande beräkning, under antagande av att det inte förekommer någon friktion mot deponeringshålet i den initiala termohydromekaniska modelleringen. Den kan även bedömas i den integrerade systemmodellen, se avsnitt 8.1. Effekterna kommer att beaktas i den fortsatta planeringen av initiala termohydromekaniska beräkningar.

### **6.5.5 Långsiktig modellering av kemisk utveckling av buffert och återfyllning**

Den långsiktiga kemiska utvecklingen av bufferten studerades med en tankmodell /Bruno et al, 1999/ i SR 97. Modellen har sedan dess utvecklats och innefattar nu flera buffertreaktioner och en mera detaljerad beskrivning av transporten i bufferten.

Den förbättrade modellen kommer att användas i SR-Can för att studera den kemiska utvecklingen i grundvatten/buffert/återfyllning. Bland grundvattentyper som ska studeras kan nämnas referensvatten från undersökningsplatserna, grundvatten med hög salthalt och låg jonstyrka samt eventuellt cementlakvatten. En plan för modellstudierna har etablerats. De första modelleringsresultaten förväntas under hösten 2003. Tidplanen för modelleringsprojektet kommer att samordnas med den för SR-Can.

Då det gäller modellens giltighet återstår att förklara skillnaden mellan nyligen framlagda experimentella resultat /Karnland et al, 2000/ och modelleringsarbete /Domènech et al, 2003/ kring jonbytesreaktioner.

### **6.5.6 Radionuklidtransportegenskaper**

De viktigaste radionuklidtransportegenskaperna för bufferten, utgående från att diffusion är den dominerande transportprocessen, är buffertdensitet, effektiv diffusivitet och distributionskoefficienterna ( $K_d$ -värden) där de två senare beror på buffertens kemiska status och på temperaturen. Buffertdensiteten fastställs så som diskuteras ovan; Diffusiviteter och distributionskoefficienter kommer att fastställas för ett antal möjliga förhållanden hos bufferten som del av planen för indatasammanställning för SR-Can, se avsnitt 2.11. Dessa egenskaper är viktiga även för återfyllningen, men även tillkommande egenskaper om advektion skulle vara en viktig transportmekanism i återfyllningen.

### 6.5.7 Kolloidbildning/-erosion från buffert/återfyllning för grundvatten med låg jonstyrka

Kolloidbildning och därmed erosion av buffert eller återfyllning ska utvärderas med hänsyn till nyligen framlagda experimentella resultat /Wold, 2003/. Experimenten visar kolloidbildning vid 1 mM av tvåvärda katjoner i naturlig Mx-80-bentonit. Fullständigt  $\text{Ca}^{2+}$ -utbytt lera uppvisar emellertid ingen kolloidbildning.

### 6.5.8 Gasfrågor

Generella gasfrågor i säkerhetsanalyser kommer att diskuteras i en senare rapport från EG-projektet GASNET. Behandlingen i SR-Can kommer i stort sett att baseras på denna rapport.

Gas är en viktig fråga endast om det finns en defekt i kopparkapseln, när vätgas genereras genom järnkorrosion. Gasfrågor utvärderas i ett antal steg

1. Gasbildning. Vilken är korrosionshastigheten för järninsatsen? Vilken yta är tillgänglig för korrosion? Kommer korrosionen att begränsas av tillgången på vatten? etc. Detta resulterar i gasbildningshastigheten inuti kapseln.
2. Gasmigration. Gasbildningen medför tryckökning i kapseln. Om bildningshastigheten är låg kan gasen hinna bortföras genom diffusion, men sannolikare är att transportvägar öppnas i bufferten. Effekterna av denna process kommer att utvärderas med hjälp av nyligen framlagda experimentella data /Harrington och Horseman, 2003/.
3. Konsekvenserna av gasbildning. De möjliga konsekvenserna av gasbildning i förvaret är följande:
  - Övertryck på grund av gasbildning och därav följande potentiella skador på förvaret och berggrunden.
  - Effekter på grundvattenrörelse. Gas kan potentiellt pressa ut kontaminerat vatten ur kapseln eller förvaret.
  - Gasfasen i sig själv kan snabbt transportera gasformiga radionuklider till biosfären, eller till och med utgöra en brandfara.
  - Vätgas kan även påverka närzonens kemi (bränsleavsnittet).

### 6.5.9 Kapselsjunkning

Kapselsjunkning har undersökts och rapporterats. En krypt teori baserad på laboratorietest har utvecklats /Börgesson et al, 1995/ och används för beräkningar av kapselförflyttning i ett deponeringshål (egentligen för två kapslar i ett hål) /Börgesson, 1993/. Det finns två tveksamheter kring dessa resultat

1. Endast deviatoriskt kryp har beaktats, vilket innebär att buffertens volym inte förutsätts ändras på grund av krypning. Volymetriskt kryp beaktas därmed inte. Det har funnits planer för volymetriskt kryp, men hittills har inga test utförts. Det finns faktiskt ett starkt skäl att försumma volymetriskt kryp: Effekten är ytterst liten och bidrar inte till reduktion av den totala vikten av bentonit mellan kapsel och berg eftersom den endast kompakterar bentoniten. Alltså kompenseras förlusten i buffertjocklek av en ökad densitet.

2. Teorierna och den matematiska modellen är empiriska och baserade på kryptest som har utförts under begränsad tid. Det är därför svårt att bevisa att dessa modeller gäller för 100 000 år. Testen har bedrivits under cirka 12 dagar (därmed är värdet så litet att mättekniska problem uppstår) och kan därför bevisas vara giltigt mellan 1 och  $10^6$  sekunder, men teorin extrapoleras till att gälla för  $10^{13}$  sekunder. Det finns två sätt att öka tillförlitligheten:
- A. Göra kryptest under upp till 3 år. Emellertid är de mättekniska problemen synnerligen svåra och en teknik måste utvecklas för att övervinna dem. Detta skulle kunna bli mycket kostsamt. Dessutom skulle vi ändå ha kvar problem med extrapolering.
  - B. Försök hitta naturliga analogier med t ex block eller stora stenar i en bentonitansamling. Emellertid kan det vara svårt att bevisa att dessa stenar har sjunkit mindre än en decimeter.

Det är alltså svårt att hitta en metod att öka trovärdigheten för det arbete som hittills har gjorts. Eventuellt kommer en scenariovariant att ingå i SR-Can där konsekvenserna av kapselsjunkning bedöms.

## 7 Intrångsfrågor

Detta kapitel beskriver hur intrångsfrågor ska hanteras i SR-Can. Den föreslagna hanteringen är i stort sett densamma som i SR 97.

### 7.1 Föreskrifter och råd

Råden till SKIFS 2002:1 nämner i gruppen ”mindre sannolika scenarier”, sådana som ”beaktar effekter av framtida mänsklig verksamhet såsom skador som tillfogats barriärer”, medan ”skador på människor som gör intrång i slutförvar belyses i restsценarier”.

I SSI FS 1998:1 definieras intrång som ”mänskligt handlande vid ett slutförvar som kan påverka dess skyddsförmåga”. 9 § av SSI:s författning anger: ”Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar skall redovisas för de olika tidsperioder som anges i 11–12 §§. Slutförvarets skyddsförmåga efter intrång skall beskrivas.” I 11–12 §§ läggs särskild tonvikt på de första 1 000 åren.

Det är även viktigt att notera att bakgrundsdokumentet till SSI FS 1998:1 tydligt säger att intrångsscenarioer inte ska ingå i riskberäkningarna.

Bakgrundsdokumentet säger vidare att ”En viktig utgångspunkt för diskussioner om krav kopplade till intrång är att samhället har ansvar för sina egna medvetna handlingar. Det är därför inte nödvändigt, i samband med en ansökan, att belysa frågor om avsiktligt och av samhället sanktionerat intrång i ett avfallsförvar...”

”Det väsentliga är inte att redovisa den händelsekedja som leder fram till intrånget, utan att belysa slutförvarets kvarhållande förmåga efter ett intrång...”

### 7.2 Behandling i SR-Can

Framtida mänskliga ingrepp i SR-Can kommer att begränsas till ingrepp som:

- utförs efter förslutning av förvaret,
- sker vid eller nära förvaret,
- är oavsiktliga,
- försämrar prestanda för förvarets barriärer.

Mänskliga ingrepp som sker före förslutning av förvaret och som försämrar dess barriärfunktioner hanteras i andra scenarier, som t ex bristande förslutning av förvaret. Pågående eller framtida mänskliga ingrepp som orsakar storskaliga eller globala förändringar, t ex emission av växthusgaser, undantas också från behandling men kan hanteras på annat sätt i SR-Can.

Svensk lag föreskriver att ansvaret för medvetet intrång i ett förvar ligger hos det samhälle som tillåtit handlingen. Detta synsätt är internationellt accepterat /NEA, 1995/. Alltså ska endast oavsiktliga ingrepp som försämrar förvarets funktioner beaktas i SR-Can. En handling betraktas som oavsiktlig om platsen för förvaret är okänd, dess syfte glömt och konsekvenserna av handlingen är okända.

### **7.2.1 Metod**

Analyserna av framtida mänskliga ingrepp som försämrar förvarets prestanda delas in i följande fyra delar;

1. Teknisk analys.
2. Analys av samhällsliga faktorer.
3. Val av representativa scenarier.
4. Analys av valda scenarier.

#### ***Teknisk analys***

Identifieringen av ingrepp som kan försämma förvarets funktion ska baseras på en beskrivning av förvarssystemet och på aktuell teknisk kunskap och praxis. En lista över tänkbara mänskliga ingrepp som försämrar förvarets prestanda ska sammanställas. Detta innefattar en granskning av alla intrångsrelaterade FEP i SR-Can FEP-databasen. Ingreppen beskrivs, motiveras och förklaras i tekniska termer.

#### ***Analys av samhällsliga faktorer***

Rådande samhällsliga förhållanden är av vikt både för eventualiteten av oavsiktliga mänskliga ingrepp som försämrar djupförvarets säkerhet och för bedömning av deras konsekvenser. Viktiga frågor är varför den skadliga handlingen utförs och aktuella samhällsliga förhållanden som allmän kunskapsnivå och gällande föreskrifter. Dessa i första hand humanistiska och socio-ekonomiska frågor analyserades i SR 97 /Morén et al, 1998/ och SR-Can-analysen ska baseras på samma referens.

#### ***Val av representativa scenarier***

Resultaten av tekniska och socio-ekonomiska analyser sammanställs och ett fåtal scenarier väljs för att illustrera hur några framtida mänskliga ingrepp kan påverka förvaret.

#### ***Analys av valda scenarier***

Analysen av de valda scenarierna består av tre delar:

- Syfte med och förverkligande av scenariot  
Bakgrund till varför och hur handlingar utförs.
- Sannolikhet för att scenariot ska bli aktuellt  
Diskussion om, och om möjlig, uppskattningar av sannolikheten för scenariot.
- Radiologiska konsekvenser och risk  
Inverkan på barriärprestanda beskrivs och de radiologiska konsekvenserna uppskattas baserat på en beskrivning på vad de inträngande personerna kan göra när de hittar förvaret.

Dosberäkningar gäller främst människor som är omedvetna om handlingen och som i ett senare skede exponeras för radionuklider som tränger ut från det skadade förvaret. Doser till personer som är inblandade i handlingen uppskattas också.

### **7.2.2 Plan**

Resultat från arbete med FEP-databasen i SR-Can kommer att ingå i den tekniska analysen och därpå följande val av representativa scenarier. Analysen av valda scenarier kommer att vara djupare än i SR 97. I övrigt kommer analysen av framtida mänskliga ingrepp att baseras på samma referenser som i SR 97.

En preliminär redovisning av intrångsscenarier ges i interimrapporten av SR-Can.



## 8 Integrerad modellering

### 8.1 Systemutveckling

Systemet av kopplade processer som styr den långsiktiga utvecklingen är komplext. I den matematiska modelleringen av djupförvarets utveckling studeras därför processsystemet med olika processmodeller, där var och en behandlar en viss aspekt av den totala utvecklingen. Ofta hanterar dessa modeller antingen termiska, hydrauliska, mekaniska eller kemiska processer. Integration av alla aspekter på utveckling åstadkoms normalt som ett resonemang kring resultaten från processmodellerna, inom ramen för en säkerhetsredovisning.

Nyligen har en systemmodell utvecklats som består av flera integrerade delmodeller, där var och en efterliknar en processmodell /Hedin, 2003b/. Systemet av behandlade processer är med nödvändighet förenklat. Exempelvis utesluts den kortvariga mättnadsfasen hos bufferten där kopplingen mellan olika processer är starka, liksom detaljerad hydromodellering av den heterogena sprickiga berggrunden.

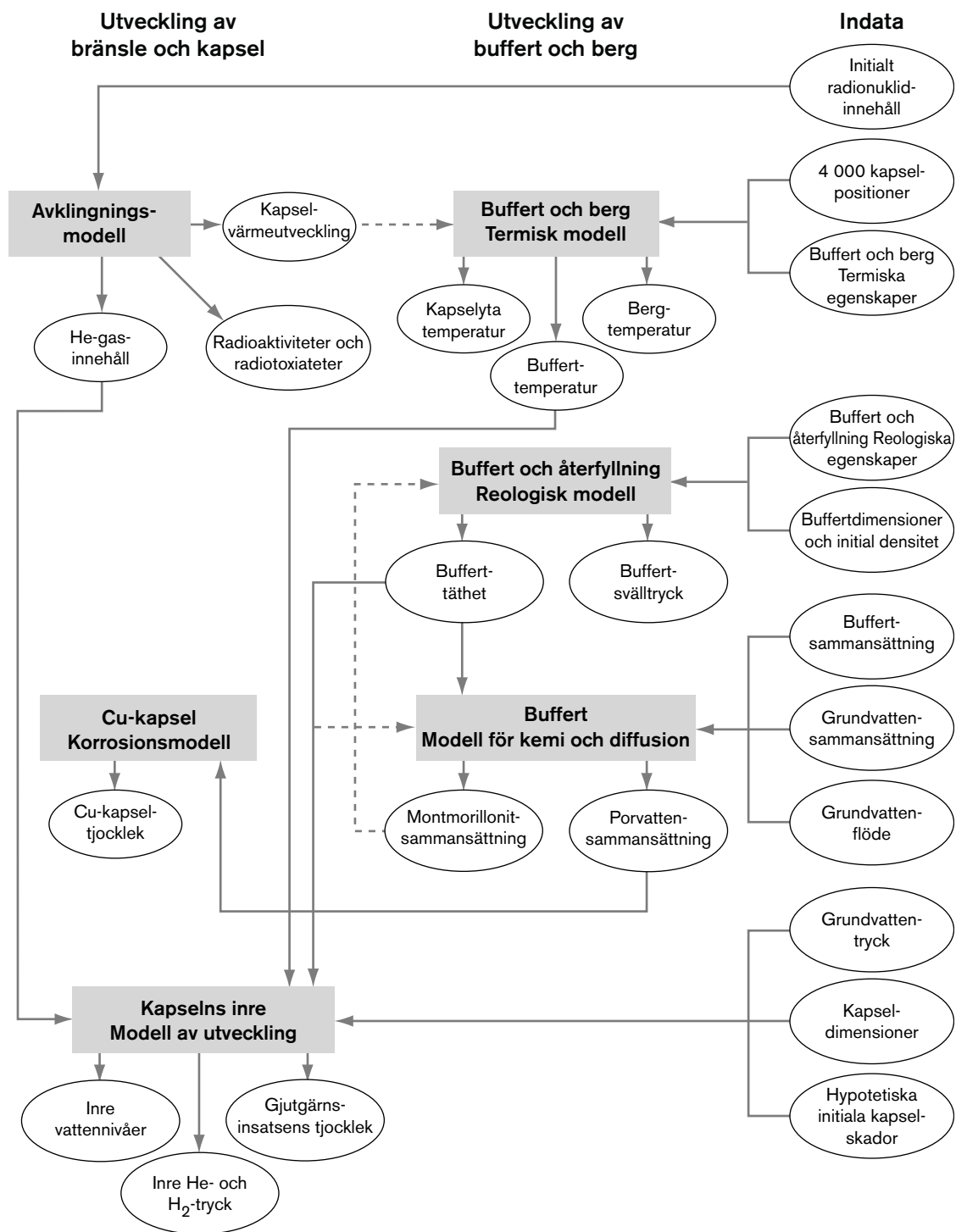
Den första versionen av systemmodellen behandlar inte radionuklidutsläpp och -transport. En förenklad beskrivning finns även av dessa fenomen, se avsnitt 8.2, och kan eventuellt läggas in i framtida versioner av systemmodellen.

Ett huvudskäl för utveckling av systemmodellen är att få en integrerad behandling av de viktigaste processerna i den långsiktiga förvarsutvecklingen, vilket säkerställer att en konsistent indata-databas används för modellering av alla aspekter på utvecklingen och att tidsberoende utdata från en delmodell kan användas direkt som indata till en annan modell. Dessutom styrs det integrerade modelleringsverktyget direkt av säkerhetsanalytikern snarare än av ett antal olika, spridda expertgrupper. Ett antal åtgärder har vidtagits för att öka beräkningshastigheten. Detta tillåter snabb utvärdering av många olika uppsättningar indata och möjliggör dessutom probabilistiska bedömningar. Modellen kan exekveras probabilistiskt, men ännu har endast deterministiska resultat tagits fram eftersom databasen för probabilistiska beräkningar fortfarande är otillräcklig.

Andra orsaker att utveckla modellen är en önskan att vinna insikt i den relativa betydelsen av olika processer på en övergripande nivå och att ge kvalitetssäkring i form av en oberoende uppsättning modeller för viktiga aspekter på djupförvarets utveckling. Ambitionen är emellertid inte att ersätta mera detaljerade processmodeller. Dessa kommer alltid att behövas för att fullt ut inkludera alla detaljer i mekanismerna bakom individuella processer och som en nödvändig bas för utveckling av förenklade modeller. Vidare kommer det alltid att krävas expertis bakom utvecklingen av processmodeller för att beskriva och motivera det gemensamma vetenskapliga underlaget för båda typerna av modeller.

Figur 8-1 visar uppsättningen processmodeller som har inkluderats som delmodeller i systemmodellen, och hur delmodellerna hör ihop.

Ytterligare beskrivning av olika delmodeller, jämförande testresultat etc ges i /Hedin, 2003b/. En mera detaljerad och uppdaterad rapport kommer att tas fram inom SR-Can-projektet.

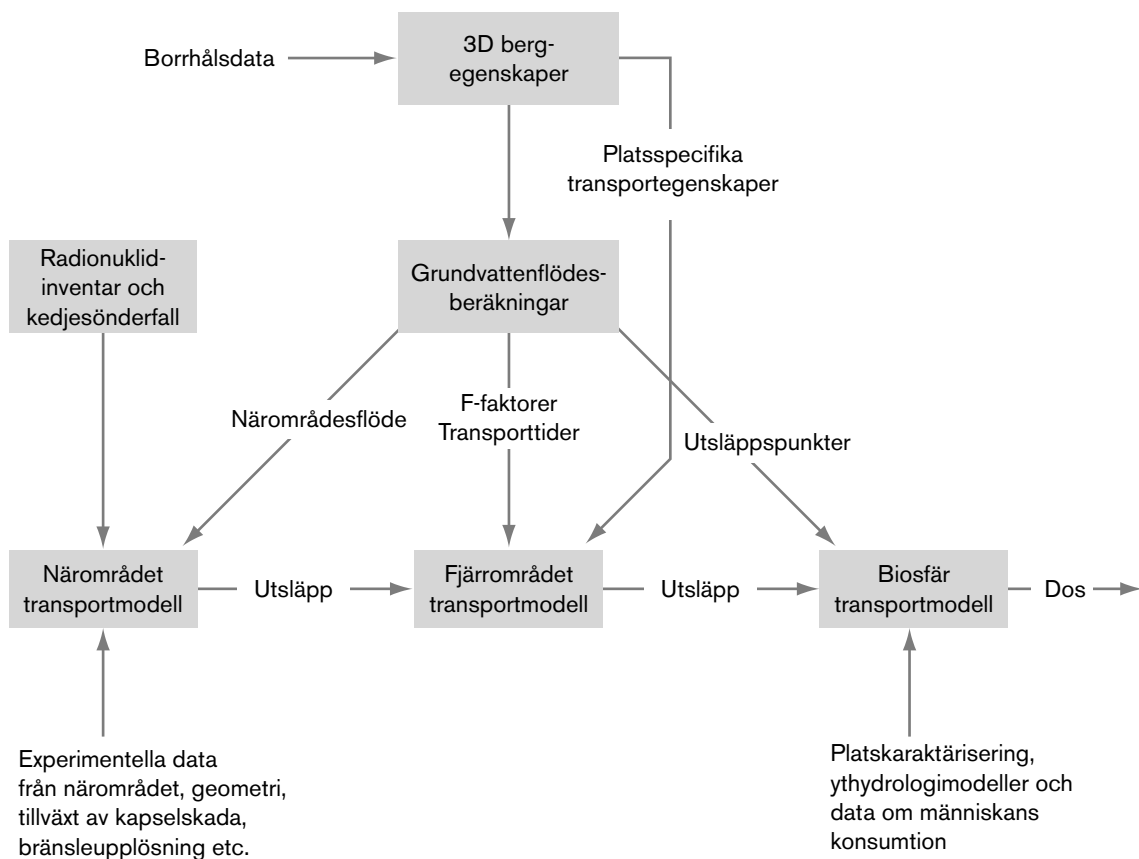


**Figur 8-1.** Systemmodell med delmodeller representerade som rektanglar. Indata och tidsberoende beräkningsresultat visas som ellipser. Streckade linjer representerar kopplingar som ännu inte är fullt implementerade.

Processavbildningen i tabell 2-1 indikerar vilka processer som ingår i modellen idag. Utvecklingen av modellen kommer att fortsätta med målet att föra in så många processer som möjlig tidigt i SR-Can-projektet. Modellen kommer att användas som ett av flera verktyg med vilka den allmänna systemutvecklingen studeras i SR-Can.

## 8.2 Radionuklidtransport- och dosberäkningar

Radionuklidtransportberäkningar utförs för att uppskatta risken från ett förvar. Eftersom många av parametrarna i denna typ av beräkning antingen har en naturlig variabilitet eller i viss mån kan vara okänd fordras probabilistiska beräkningar, där modellparametrarna tillåts variera i enlighet med någon typ av föreskriven sannolikhetsfördelning. I SKB:s tidigare säkerhetsanalyser har transportberäkningar exekverats med en probabilistisk beräkningskedja som innefattar transport genom närzonen, fjärrzonen och biosfären, där även dosen uppskattas. Dessa probabilistiska beräkningar har stötts av andra simuleringar som genererar några av de nödvändiga parametrarna. Figur 8-2 visar samverkan mellan de olika modeller som är avsedda att användas i SR-Can-beräkningarna, vid sidan om beräkningsmoduler för transportberäkning (för närzon, fjärrzon och biosfär). Figuren visar även hur dessa moduler är kopplade till andra beräkningsverktyg och vilka data de olika modellerna kräver. Dessa data kan ges i form av sannolikhetsfördelningar för de flesta ingångsparametrar. Dessa sannolikhetsfördelningar kan baseras på t ex experimentella data eller resultatet av en tidigare utförd beräkning som av olika skäl kan vara olämplig att köra i den probabilistiska transportberäkningskedjan.



**Figur 8-2.** Schematisk bild av olika delmodeller i radionuklidtransportberäkningen.

Grundvattenflödesberäkningar baserade på tolkningar och modellering av platsspecifika borrhålsdata kommer att genomföras i ett separat program (CONNECTFLOW eller DarcyTools, se avsnitt 5.2) och användas på olika sätt av transportmodeller. Dessa grundvattenflödesberäkningar är tidsödande och utförs i förväg. Därför används korrelerade sannolikhetsfördelningar från flödesberäkningar som indata för radionuklidtransportmodeller för närzonen, fjärrzonen och biosfären.

Nyligen har analytiska förenklade versioner av när- och fjärrzonstransportmodeller utvecklats /Hedin, 2002a/. Dessa modeller använder samma indata som motsvarande numeriska modeller och doserna beräknas med hjälp av ekosystemspecifika konverteringsfaktorer. Modellerna kan exekveras probabilistiskt och ger resultat i god överensstämmelse med deterministiska och probabilistiska beräkningsfall i SR 97. En enstaka realisering med de analytiska modellerna exekveras på cirka 0,1 sekunder på en 2 GHz persondator, vilket gör dem väl lämpade för omfattande probabilistiska beräkningar. De analytiska modellerna ska användas som ett komplement till numeriska modeller i SR-Can-projektet, särskilt för tidiga gränssättande beräkningar och för kompletterande probabilistiska beräkningar.

De följande avsnitten beskriver kortfattat plattformarna för numeriska radionuklidtransportberäkningar och numeriska modeller för närzonen, fjärrzonen och biosfären.

### **8.2.1 Plattformar för radionuklidtransportberäkningar**

Radionuklidtransportberäkningarna i SKB:s säkerhetsanalyser har utförts med Proper-systemet (SKB 91, SR 95 och SR 97). Proper-paketet, skrivet i Fortran 77, består av ett antal delmoduler som hanterar transportberäkningen, se figur 8-2. Närzonstransportberäkningen hanteras av Proper-delmodulen COMP23 /Romero, 1995/, fjärrzonen av FARF31 /Norman och Kjellbert, 1990/ och biosfärtransporten av BIO42. Proper-miljön har inte bara en centralstyrd kommunikation mellan de olika modulerna utan även rutiner för att genomföra deterministisk simulering och bibliotek med extra verktyg för numeriska beräkningar (NUMLIB). Dessutom ger miljön delmoduler för kommunikation med grundvattenflödesmodellen, viktning och summering av tidsserier (SUM41) och kommunikation med ASCII-filer utanför Proper (TS01 och PICK51).

Som ett komplement till Proper-paketet utvecklas för närvarande ett alternativt program som kan exekveras på en persondator. Det ska användas parallellt med Fortran77/UNIX-versionen i säkerhetsanalysberäkningarna i SR-Can. PC-versionen, som bygger på samma konceptuella modeller som Proper-paketet, har utvecklats separat från Fortran77/UNIX-versionen och är skrivet som ett Matlab-program. Matlab är ett vanligt förekommande verktyg inom programkonstruktion och erbjuder ett stort urval matematiska funktioner, ett scriptspråk och en grafisk miljö, Simulink, där modeller enkelt kan byggas och där olika delmodeller kan kopplas samman på ett enkelt sätt.

För närvarande är närzonsberäkningen fullständigt implementerad i Matlab och Simulink, varför beräkningar motsvarande dem som hanteras av delmodulen COMP23 kan köras i det alternativa programmet. Arbetet att implementera fjärrzonsberäkningar pågår. För ändamålet används det befintliga Fortran77-programmet och gränssnittet har skrivits så att programmet kan användas som en Matlab-funktion. Biosfärmodulen har utvecklats till ett betydligt mångsidigare verktyg. Medan Proper-modulen utnyttjar doskonverteringsfaktorer beräknade av ett externt program, kan Matlab-versionen antingen beräkna doskonverteringsfaktorer i förväg eller genomföra tidsberoende biosfärberäkningar som del av en probabilistisk beräkningskedja.

Förutom Matlab-paketet kan PC-versionen använda det kommersiellt tillgängliga risk-analysprogrammet @Risk för probabilistiska analyser. @Risk kan generera ett stort antal sannolikhetsfördelningar, utföra probabilistiska simuleringar och köra externa program som Matlab. Vidare ger kombinationen Matlab/@Risk en transparent miljö för säkerhetsanalysberäkningar.

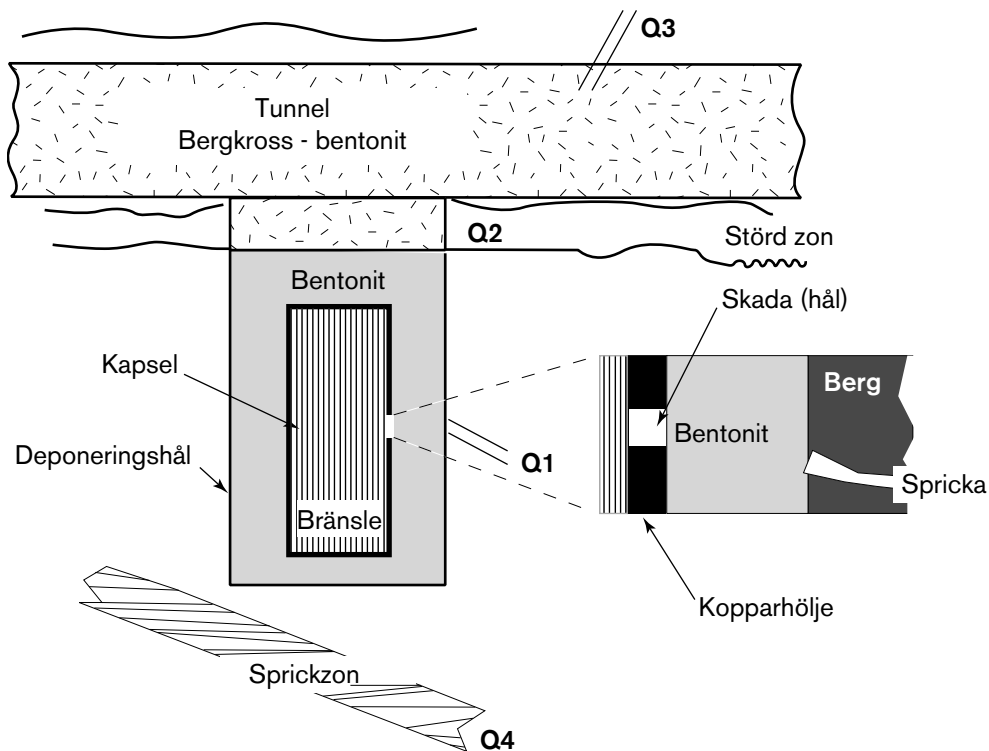
För närvarande är processortiden för en enstaka COMP23-realiserings med Fortran77/UNIX-versionen (på den 400 MHz Sun Enterprise 450 som användes i SR97) och Matlab/PC-versionen (på en arbetsstation Intel 1700 MHz Compac Deskpro) av samma storleksordning (några minuter) för exekveringar med 9 nuklider som används i probabilistiska beräkningar för SR97. För de deterministiska simuleringar med 32 nuklider som utförts i SR97 var däremot processortiden mycket kortare med Fortran77/UNIX-versionen. Deterministiska exekveringar med ett stort antal nuklider på nuvarande Matlab/PC-version kräver därför någon form av optimering (olika kedjor kan t ex köras separat). Tack vare den utpräglade porterbarheten hos Matlab-programmet (Matlab finns för många olika plattformar) kan Matlab-implementering, med relativt liten ansträngning, köras på en annan plattform om kapaciteten på PC-plattformen av någon anledning skulle bedömas vara otillräcklig. Fjärrzon- och biosfärmodulerna ger obetydliga realiseringsstider i jämförelse med närzonsmodellen.

## 8.2.2 Närzonsmodellen

Närzonsmodellen COMP 23 ska användas i SR-Can. Detta är samma modell som användes i SR 97 och den utvecklades ursprungligen från NUCTRAN-programmet /Romero, 1995; Romero et al, 1999/. COMP23 är en modell för multipla transportvägar som beräknar transient nuklidtransport i närzonen kring ett förvar, med hjälp av ett nätverk av resistanser och kapacitanser som kopplas samman analogt med ett elektriskt nätverk. Analytiska lösningar ingår istället för fin diskretisering vid känsliga zoner, till exempel vid utsläppspunkten vid kapselhålet och vid ingången till sprickor, i syfte att accelerera beräkningarna. Medan COMP23-modellen som användes i SR 97 bara kunde hantera radionuklidtransport genom diffusion, har dagens version modifierats för att kunna simulera även advektiv transport. Ytterligare en utveckling sedan SR 97 är att alla nuklider av ett visst grundämne nu kan dela grundämnets lösligheter inuti kapseln, där radionuklidkoncentrationer påtvingas löslighetsbegränsningar.

Figur 8-3 visar hur kapseldeponeringshålen och återfyllningen modellerades i SR 97. I den modellen användes fyra olika flödesvägar, Q1–Q4, för gränssnittet närzon/fjärrzon.

För att representera barriärsystemet, genom vilket radionuklider transporteras, använder COMP23 en integrerad finit differensmetod och compartment-konceptet.



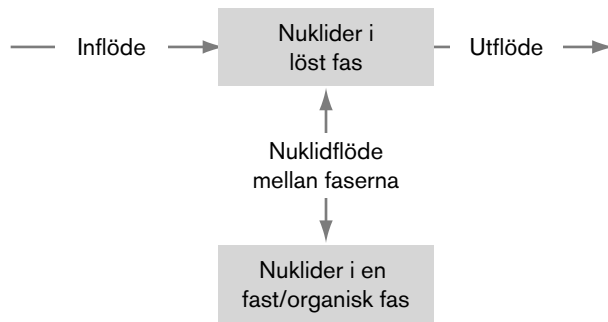
**Figur 8-3.** Schematisk bild av närzonen, med de transportvägar som användes i SR 97.

### 8.2.3 Fjärrzonsmodellen

Fjärrzonsmodellen för SR-Can liknar den som användes i SR 97. Denna modell, FARF31, /Norman och Kjellbert, 1990/ beräknar transporten av upplösta radionuklider genom sprickigt berg, retentionen orsakad av samverkan mellan nuklider och bergmatrisen, och kedjesönderfall. Se vidare i avsnitt 5.3.

### 8.2.4 Biosfärmodellen

Radionuklidtransport genom biosfären och doser till människor hanterades i SR 97 av Proper-delmodulen BIO42. Denna modul baserades på nuklid- och ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorer (EDF-värden) som omvandlar nuklidutsläpp till ett ekosystem till doser. I SR 97 beräknades EDF-värdet för sex ekosystem (brunn, sjö, flod, torvmosse, odlingsjord, kust) i ett separat program /Bergström et al, 1999/ med allmänna data för ekosystemparametrar. De olika ekosystemen representerades av s k compartment-modeller där varje "compartment" representerade en distinkt del av ett ekosystem. Figur 8-4 visar som exempel en torvmosse modellerad som två compartments, vilka representerar nuklider upplösta i vatten respektive nuklider sorberade på organiskt och/eller fast material. Nuklidutväxlingen mellan dessa båda "compartment" modellerades med ekosystem- och grundämnesspecifika fördelningskoefficienter ( $K_d$ ). I den modellerade torvmossen, figur 8-4, sker både nuklidinflöde och -utflöde i den lösliga fasen och styrs därför av vattenbalansen. Beroende på vattenutväxlingen vid den studerade platsen kan in- och utflöde ske till andra ekosystemmodeller, inflöde ske från utsläppspunkter från geosfärens strömrör eller utflöde av nuklider ske från modelldomänen. I SR 97 beaktades emellertid endast enskilda ekosystem, med indata endast från utsläppspunkter från strömrör.



**Figur 8-4.** *Compartment-modell av en torvmosse.*

### **Biosfärberäkningar i SR-Can**

I SR-Can kommer platsen att vara bättre känd och underlaget för modellering av ekosystem och samverkan mellan olika ekosystem förbättrat. Figur 8-5 visar hur en nedströms nuklid transport kan hanteras i biosfärmodellen om vattenflödet vid platsen är känt. I skissen förutsätts nuklider komma in i en torvmosse, vilken kan modelleras så som indikeras i figur 8-4, via grundvattnet. Radionuklidutflödet från denna modell visas som inflöde i, till exempel en vattendragsmodell och senare i en sjömodell etc. Till skillnad mot de modeller som användes i SR 97 kan människor exponeras för nuklider från alla modellerade ekosystem samtidigt, t ex för radionuklider från torvförbränning, bevattning av odlingsmark från vattendrag och från förtäring av akvatiska livsmedel från en sjö.

Medan biosfärberäkningarna i SR 97 utfördes i ett separat program och importerades till Proper-paketet som sannolikhetsfördelningar, är avsikten i SR-Can att genomföra biosfärtransportberäkningen i Matlab/Simulink-versionen av säkerhetsanalysprogrammet. Biosfärsimuleringar kan antingen genomföras som del av en probabilistisk datorberäkningskedja eller separat med nuklidutsläpp från varje realisering av när- och fjärrzonsmoduler.

Som ett komplement till de compartment-baserade biosfärmodeller som användes i SR 97 pågår arbete med att implementera så kallade processmodeller i biosfärssimuleringsverktyget, se avsnitt 4.5. Dessa modeller är baserade på överväganden om energi- och näringsbalanser och kan även användas för att generera indata till compartment-modellerna. Genom att använda Matlab/Simulink-paketet för simulering kan man använda dessa modeller i kombination med tidigare befintliga compartment-modeller och på så sätt genomföra mer komplexa simuleringar.



**Figur 8-5.** *Koppling av modeller till en nedströms radionuklidtransport.*

## 9 Referenser

**Agrenius, 2002.** Criticality safety calculations of storage canisters. SKB TR-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ahn T M, Cragnolino G A, Chan K S, 1999.** Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 556 pp 525–533.

**Andersson J, 1999.** Data and data uncertainties. Compilation of data and data uncertainties for radionuclide transport calculations, SKB TR-99-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén, K-E, Ericsson L O, 2000.** What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Berger A, Guiot J, Kukla G, Pestiaux P, 1980.** Long-Term Variations of Monthly Insolation as Related to Climate Changes, International Alfred Wegener Symposium, Band 70, Heft 2, 748–758.

**Berger A, Loutre M F, 1991.** Insolation values for the climate of the last 10 million years, Quaternary Science Reviews, **10**, 297–317.

**Berger A, Loutre M F, Gallee H, 1996.** Sensitivity of the LLN 2-D climate model to the astronomical and CO<sub>2</sub> forcings (from 200 kyr BP to 130 kyr AP), Scientific Report 1996/1, Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître, Université Catholique de Louvain.

**Berger A, Loutre M-F, 1997.** Palaeoclimate Sensitivity to CO<sub>2</sub> and Insolation. Ambio Vol 26, No 1, 32–37.

**Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments. Modules for various biosphere types, SKB TR-99-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**BIOCLIM, 2001.** Global climatic features over the next million years and recommendation for specific situations to be considered. BIOCLIM Deliverable 3, EC-CONTRACT : FIKW-CT-2000-00024.

**Bond A E, Hoch AR, Jones G D, Tomczyk A J, Wiggin R M, Worraker W J, 1997.** Assessment of a spent fuel disposal canister. Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component. SKB TR 97-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Boulton G S, Payne A, 1993.** Simulation of the European ice sheet through the last glacial cycle and prediction of future glaciation. SKB TR-93-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 2001.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Bruno J, Cera E, de Pablo J, Duro L, Jordana S, Savage D, 1997.** Determination of radionuclide solubility limits to be used in SR 97. Uncertainties associated to calculated solubilities. SKB TR 97-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.



- Bruno J, Arcos D, Duro L, 1999.** Processes and Features Affecting the Near Field Hydrochemistry, SKB TR-99-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bäckblom G, Munier R, 2002.** Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB TR-02-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, 1993.** Study of the mechanical function of the buffer in the concept with two canisters in a KBS3 deposition hole. SKB AR 93-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Johannesson, L-E, Sandén T, Hernelind J, 1995.** Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application. SKB TR 95-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2003.** "Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer", SKB TR-03-XX Under framtagning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Calvez M, 2001.** The EC BIOCLIM Project (2000–2003) 5th Euratom Framework Programme – Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal, 3rd IGSC meeting (Integration group for safety case) 24 oct. 2001, OECD/NEA, Paris, France, EC-CONTRACT : FIKW-CT-2000-00024, <http://www.andra.fr/bioclim>
- De Beaulieu J L, Guiot J, Reille M, 1991.** Long European pollen records and quantitative reconstructions of the last glacial cycle. In: Goodess, Palutikof eds. Future climate change and radioactive waste disposal, NIREX NSS/R257, 116–136.
- Domènech C, Arcos D, Bruno J, Karnland O, Muurinen A, 2003.** Geochemical model of the granite-bentonite-groundwater at Äspö (Lot experiment) MRS symposium Kalmar, 2003.
- Emeliani C, 1955.** Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* 63 (1955), 538–578.
- EU, 2002.** SPIN Project, EUR 19965 EN, 2002 "Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN)".
- French H M, 1996.** The periglacial environment. Longman, 2nd edition, Harlow, England.
- Glamheden R, Hökmark H, 2003.** Creep in rock masses. State of knowledge. Under framtagning.
- Grambow B, Loida A, Martínez-Esparza A, Díaz-Arocas P, de Pablo J, Paul J-L, Marx G, Glatz J-P, Lemmens K, Ollila K, Christensen H, 2000.** Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form. European Commission EUR 19140 EN.
- Guiot J, Pons J, de Beaulieu L, Reille M, 1989.** A 140,000-year continental climate reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 338 (6213), 309–331.
- Guiot J, Reille M, de Beaulieu J L, Pons A, 1992.** Calibration of the climatic signal in a new pollen sequence from La Grande Pile. *Climate Dynamics* 6, 259–264.
- Hakami E, Olofsson S-O, 2002.** Numerical modelling of fracture displacement due to thermal load from a KBS-3 repository. SKB TR-02-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Harrington J F, Horseman S T, 2003.** Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hays J D, Imbrie John, Shackleton N J, 1976.** Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages, *Science* 194 (4270), 1121–1132.
- Hedin, 1997.** Spent Nuclear Fuel – How Dangerous is it? SKB TR-97-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin, 2002a.** Integrated Analytic Radionuclide Transport Model for a Spent Nuclear Fuel Repository in Saturated Fractured Rock. *Nuclear Technology* 138 2 179 (2002).
- Hedin, 2002b.** Safety Assessment of a Spent Nuclear Fuel Repository: Sensitivity Analyses for Prioritisation of Research. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM6. Elsevier Science Ltd. (2002).
- Hedin, 2003a.** Probabilistic dose calculations and sensitivity analyses using analytic models. *Reliability Engineering and System Safety* 79 (2003) 195–204.
- Hedin, 2003b.** Integrated System Evolution Model for an SNF Deep Repository. Proceedings from the 10<sup>th</sup> International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas 2003, American Nuclear Society (2003).
- Holmén J, Forsman J, 2003.** Project report for Coupling of deep and near-surface hydrogeology – a modelling study, SKB R-03-XX, Under framtagning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmgren K, Karlén W, 1998.** Late Quarternary changes in climate. SKB TR-98-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hora S, 2002.** Expert Opinion in SR 97 and the SKI/SSI Joint Review of SR 97, SSI report 2002:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Hora S, Jensen M, 2002.** "Expert Judgement Elicitation" SSI report 2002:19, Statens strålskyddsinstitut.
- Hökmark H, Fälth B, 2003.** Thermal dimensioning of the repository. Under framtagning.
- Hökmark H, Christiansson M, Baker C, 2003.** Numerical handling of earthquakes in the vicinity of the repository. Under framtagning.
- IAEA, 1994.** Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, First report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-767, IAEA, Vienna.
- Imbrie J, Imbrie J Z, 1980.** Modelling the Climatic Response to Orbital Variations, *Science*, 207, 943–953.
- Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, McIntyre A, Mix A C, Morley J J, Pisias N G, Prell W L, Shackleton N J, 1984.** The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record, Berger A L et al. Eds. Milankovitch and Climate, Part 1, 269–305, Reidel Publishing Company.

**Karnland O, Sandén T, Johannesson L-E, Eriksen T E, Jansson M, Wold S, Pedersen K, Motamedi M, Rosborg B, 2000.** Long term test of buffer material. Final Report on the pilot parcels. SKB TR-00-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Karnland O, Muurinen A, Karlsson F, 2002.** Bentonite swelling pressure in NaCl solutions – Experimentally determined data and model calculations. Submitted to: Applied Clay Science 2002.

**King F, Ahonen L, Taxén C, Vuorinen U, Werme L, 2001.** Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository, SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Klos R A, White M J, Wickham S M, Bennett D G, Hicks T W, 2002.** Quantitative assessment of the potential significance of colloids to the KBS-3 disposal concept, SKI Report 02:34, Statens kärnkraftinspektion.

**Knopp R, 2000.** Investigation of Pu(IV) and Th(IV) colloid formation by Laser Induced Breakdown Detection (LIBD), Workshop on solubility of actinides in relation with nuclear waste matrices, Mol, Belgium, April 2000.

**Kumblad L, Kautsky U, 2003.** Strategy for development of biosphere assessment and modelling of radionuclide waste based on site data. SKB-R-03-XX Under framtagning. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Laaksoharju M, Skårman C, Skårman E, 1999.** Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information, Appl. Geochem. **14** (1999) 861–871.

**LaPointe P, Cladohous T, Outters N, Follin S, 2000.** Evaluation of the conservativeness of the methodology for estimating earthquake-induced movementst of fractures intersecting canisters. SKB TR-00-08.

**Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsunderökningar för ett djupförvar. SKB R-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lundberg J, Ford D C, 1994.** Late Pleistocene sea level change in the Bahamas from mass spectrometric U-series dating submerged speleothem, Quaternary Science Reviews **13**, 1–14.

**Löfgren A, Lindborg T, 2003.** A Descriptive Ecosystem Model – a strategy for model development during site investigations. SKB R-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Marsic N, Hartley L, Jackson P, Poole M, Morvik A, 2001.** Development of hydrogeological modelling tools based on NAMMU, SKB R-01-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Marsic N, Hartley L, Sanchez-Friera P, Morvik A, 2002.** Embedded regional/local-scale model of natural transients in saline groundwater flow. Illustrated using the Beberg site, SKB R-02-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Matzke HJ, 1983.** Radiation enhanced diffusion in UO<sub>2</sub> and (U,Pu)O<sub>2</sub>. Radiation effects, **75**, 317–325 (1983).

- Miller B, Lind A, Savage D, Maul P, Robinson P, 2002.** Natural Elemental Concentrations and Fluxes: Their Use as Indicators of Repository Safety. SKI Report 02:3, Statens kärnkraftinspektion; SSI report 2002:02, Statens strålskyddsinstitut.
- Morén L, Ritchey T, Stenström M, 1998.** Scenarier baserade på mänskliga handlingar Tre arbetsmöten om metod- och säkerhetsanalysfrågor, SKB R-98-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Crawford J, Neretnieks I, 2003.** Modelling of solute transport under flow conditions varying in time using CHAN3D, MRS 2003.
- NEA, 1991.** Review of safety assessment methods. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- NEA, 1995.** Future human actions at disposal sites. A report from the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites. OECD/NEA, Paris, France.
- NEA, 1997a.** Lessons learnt from ten performance assessment studies. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- NEA, 1997b.** Disposal of Radioactive Waste. The Probabilistic System Assessment Group: History and Achievements 1985–1994. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Neck V, Kim J I, 1999.** Solubility and hydrolysis of tetravalent actinides, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6350.
- Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use in the PROPER package, SKB TR 90-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Norman S, 1992.** HYDRASTAR – a code for stochastic simulation of groundwater flow, SKB TR 92-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Näslund J O, Jansson P, 2003.** Project plan: Basal conditions and hydrology of continental ice sheets, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Näslund, J O, Rodhe L, Fastook J, Holmlund P, 2003.** New ways of studying ice sheet flow directions and glacial erosion by ice sheet modelling – examples from Fennoscandia. Quaternary, Science Reviews 22(2–4):89–102.
- Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41.
- Romero L, 1995.** The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste, Ph.D Thesis, TRITA-KET R21, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Romero L, Thompson A, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Boghammar A, 1999.** COMP23/NUCTRAN User's Guide, SKB R-99-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ronneteg U, 2001.** Oförstörande provning. Glappanalys 1. SKB Inkapslingsteknik Projekt PM TI-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Rothman A J, 1984.** "Potential corrosion and degradation mechanisms of Zircaloy cladding on spent fuel in a tuff repository", Lawrence Livermore National Laboratory rapport UCID-20172.

**Ruddiman W F, 2001.** Earth's Climate Past and Future, W. H. Freeman and Company, ISBN 0-7167-3741-8.

**Ruskeeniemi T, Paananen M, Ahonen L, Kaija J, Kuivamäki A, Frapé S, Morén L, Degnan P, 2002.** Permafrost at Lupin Report of Phase 1. GTK Report YST-112.

**Shackleton N J, 1987.** Oxygen isotopes, ice volume and sea level. Quaternary Science Reviews 6, 183–190.

**SKB, 1992.** SKB 91 – Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety. SKB TR 92-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1996.** SR 95 – Template for safety reports with descriptive example. SKB TR 96-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1999a.** SR 97 – Post-closure safety, Main report Volumes I, II and Summary, SKB TR-99-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1999b.** Process Report, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2000.** Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository, SKB TR-00-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2001.** RD&D programme 2001, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2002.** Preliminary Safety Evaluation, Based on Initial Site Investigation Data, Planning Document. SKB TR-02-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKI, SSI, 2001.** "SKI's and SSI's Joint Review of SKB's Safety Assessment Report, SR 97", Summary, SKI Report 01:3, Statens kärnkraftinspektion; SSI Report 2001:02, Statens strålskyddsinstitut.

**Smart N R, Bond A E, Crossley J A A, Lovegrove P C, Werme L, 2001.** Mat.Res. Soc. Symp. Proc. Vol 663, 477.

**Smart N R, Blackwood D J, Werme L, 2002a.** Anaerobic Corrosion of Carbon Steel and Cast Iron in Artificial Groundwaters: Part 1—Electrochemical Aspects, Corrosion Vol 58, 547.

**Smart N R, Blackwood D J, Werme L, 2002b.** Anaerobic Corrosion of Carbon Steel and Cast Iron in Artificial Groundwaters: Part 1—Gas Generation, Corrosion Vol 58, 627.

**Smart N R, Adams R, Werme L, 2003.** "Analogues for the corrosion-induced expansion of ferrous materials in HLW containers", Mat.Res. Soc. Symp. Proc. Vol XXX, YYY.

**STUK, 2001.** Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel. Guide YVL 8.4. Helsinki.

**Svensson U, 2002a.** DarcyTools – Software description and documentation, version 1.0, SKB TS-02-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Svensson U, 2002b.** DarcyTools – Concepts, methods, equations and tests, version 1.0, SKB TS-02-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Takase H, Benbow S, Grindrod P, 1999.** "Mechanical failure of SKB spent fuel canisters. Mathematical modelling and scoping calculations", SKB TR-99-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Vidstrand P, 2003.** Surface and subsurface conditions in permafrost areas – a literature review. SKB TR-03-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Wilmot R D, Galson D A, 2000.** "Expert Judgement in Performance Assessment" SKI report 2000:04, Statens kärnkraftinspektion.

**Wilmot R D, Galson D A, Hora S C, 2000.** "Expert Judgements in Performance Assessments. Report of an SKI/SSI Seminar" SKI report 2000:35, Statens kärnkraftinspektion.

**Wold S, 2003.** On diffusion of organic colloids in compacted bentonite. Doctoral thesis. Department of Chemistry, KTH, Stockholm 2003.

### Tillämpliga föreskrifter och SKBs implementering av dessa i säkerhetsvärderingen SR-Can

Denna Bilaga innehåller föreskrifter utfärdade av SKI och SSI med avseende på en säkerhetsvärdering för slutförvar för kärnavfall. Referenser till SKBs plan för implementering av föreskrifterna, så som presenteras framför allt i kapitel 2, har lagts in i kursiv stil vid motsvarande punkter i avsnitten A.1.1 (SKIFS 2002:1) och A.2.1 (SSI FS 1998:1).

#### A.1 SKI:s föreskrifter och råd

SKI har utfärdat i) Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (SKIFS 2002:1) och ii) Allmänna råd med avseende på tillämpning av dessa föreskrifter.

Medan Föreskrifterna uppenbart har legal status beskrivs de Allmänna råden i § 1 i Författningssamlingsförordningen (1976:725) som: sådana generella rekommendationer om tillämpningen av en författning som anger hur någon kan eller bör handla i ett visst hänseende.

##### A.1.1 SKIFS 2002:1

#### Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall

beslutade den 24 oktober 2001

Utgående från 20 a och 21 §§ förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet har Statens kärnkraftsinspektion utfärdat följande föreskrifter och beslutat om följande allmänna råd.

#### Tillämpning

**1 §** Dessa föreskrifter gäller anläggningar för slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (slutförvar). Föreskrifterna gäller inte för anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 19 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet.

Föreskrifterna innehåller kompletterande bestämmelser till Statens kärnkraftinspektions föreskrifter (SKIFS 1998:1) om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar.

#### Barriärer och dess funktioner

**2 §** Säkerheten efter förslutning av ett slutförvar ska upprätthållas genom ett system av passiva barriärer.

**3 §** Varje barriär ska ha till funktion att på ett eller flera sätt medverka till att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen, antingen direkt, eller indirekt genom att skydda andra barriärer i barriärsystemet.

**4 §** En brist i någon av slutförvarets barriärfunktioner, som konstateras under tiden slutförvaret är under uppförande eller driftövervakas, och som kan komma att försämra säkerheten efter förslutningen utöver vad som förutsetts i säkerhetsredovisningen<sup>2</sup>, ska utan onödigt dröjsmål rapporteras till Statens kärnkraftinspektion<sup>3</sup>. Detsamma gäller om det uppstår misstanke om en sådan brist eller om att en sådan brist kan komma att uppstå i framtiden.

### **Konstruktion och utförande**

**5 §** Barriärsystemet ska ha tålighet mot sådana förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutningen.

**6 §** Barriärsystemet ska konstrueras och utföras med hänsyn till bästa möjliga teknik<sup>4</sup>.

**7 §** Barriärsystemet ska innehålla flera barriärer så att så långt det är möjligt nödvändig säkerhet upprätthålls trots enstaka brist i en barriär.

*Hantering i SR-Can: Detta kan bevisas t ex genom några av gränfallen i avsnitt 2.12.1.*

**8 §** Inverkan på säkerheten av sådana åtgärder som väljs för att underlätta övervakning eller återtagning av deponerat kärnämne eller kärnavfall från slutförvaret eller för att försvåra tillträde till slutförvaret ska analyseras och redovisas till Statens kärnkraftinspektion.

*Hantering i SR-Can: För närvarande är inga sådana åtgärder planerade för den konstruktion av förvar som ska analyseras i SR-Can.*

### **Säkerhetsanalys**

**9 §** Utöver bestämmelserna i 4 kap. 1 § Statens kärnkraftinspektions föreskrifter (SKIFS 1998:1) om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar gäller att säkerhetsanalyserna även ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning och att sådana analyser ska göras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.

*Hantering i SR-Can: Systematisk hantering i en databas av nämnda förhållanden, händelser och processer i SR-Can diskuteras i avsnitt 2.5. Detaljerad hantering av många av dessa faktorer diskuteras i rapporten.*

**10 §** En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år.

*Hantering i SR-Can: Tidsskalan för SR-Can diskuteras i avsnitt 2.3.*

---

<sup>2</sup> Jfr kapitel 4. 2 § i Statens kärnkraftinspektions föreskrifter (SKIFS 1998:1) med avseende på säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar.

<sup>3</sup> Jfr kapitel 2. 2 § i Statens kärnkraftinspektions föreskrifter (SKIFS 1998:1) med avseende på säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar.

<sup>4</sup> Jfr kapitel 2. 3 § i Svenska miljöbalken.



## Säkerhetsredovisning

**11 §** Säkerhetsredovisningen för ett slutförvar ska, utöver vad som framgår av bestämmelserna i 4 kap. 2 § Statens kärnkraftinspektions föreskrifter (SKIFS 1998:1) om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar innehålla den information som framgår av bilaga 1 till dessa föreskrifter och som avser tiden efter förslutning.

Innan slutförvaret försluts ska den slutliga säkerhetsredovisningen förnyas och säkerhetsgranskas i enlighet med 4 kap 3 § Statens kärnkraftinspektionsföreskrifter (SKIFS 1998: 1) om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar samt vara prövad och godkänd av Statens kärnkraftinspektion.

## Undantag

**12 §** Statens kärnkraftinspektion får, om särskilda skäl föreligger, medge undantag från dessa föreskrifter om det kan ske utan att syftet med föreskrifterna åsidosätts och under förutsättning att säkerheten kan upprätthållas.

## Bilaga 1

### Följande ska redovisas beträffande analysmetoder:

- hur en eller flera metoder använts för att beskriva det passiva systemet av barriärer i slutförvaret, dess funktion och utveckling med tiden; metoden eller metoderna ska bidra till att ge en klar bild av de förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner samt de inbördes kopplingarna mellan dessa förhållanden, händelser och processer,

*Hantering i SR-Can: Formatet för systembeskrivning diskuteras i avsnitt 2.4. Beskrivningen av systemutvecklingen är uppgiften för hela analysen och kommer att diskuteras för varje scenario, se avsnitt 2.12. Några aspekter på systemutvecklingsmodellering diskuteras i avsnitt 8.1.*

- hur en eller flera metoder använts för att identifiera och beskriva relevanta scenarier för händelseförlopp och förhållanden som kan påverka den framtida utvecklingen av slutförvaret; bland scenarierna ska finnas ett huvudscenario som tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning,

*Hantering i SR-Can: Scenarioval i SR-Can diskuteras i avsnitt 2.10.*

- tillämpbarheten hos använda modeller, parametervärden och andraförutsättningar som används för beskrivning och beräkning av slutförvarets funktioner så långt det rimligen är möjligt,

*Hantering i SR-Can: Detta görs i huvudsak i process- och datarapporterna i SR-Can. Se vidare i avsnitt 2.7.1 respektive 2.11.*

- hur osäkerheter i beskrivningen av barriärsystemets funktioner, scenarier, beräkningsmodeller och beräkningsparametrar samt variationer i barriärernas egenskaper hanteras i säkerhetsanalysen, inklusive redovisning av en känslighetsanalys som visar hur osäkerheterna inverkar på beskrivningen av barriärernas utveckling och analysen av konsekvenserna för människors hälsa och för miljön.

*Hantering i SR-Can: Hanteringen av osäkerheter genomsyrar hela säkerhetsanalysen. En plan för hantering av osäkerheterna ges i avsnitt 2.14, medan känslighetsanalyser diskuteras i avsnitten 2.9.5 och 2.12.2.*

## **Följande ska redovisas beträffande analys av betingelserna efterförslutning:**

- säkerhetsanalysen enligt 9 § omfattande beskrivningar av utvecklingen i biosfär, geosfär och slutförvar för utvalda scenarier; slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.

*Hantering i SR-Can: Detta är i huvudsak rapportering av analyser av valda scenarier, se avsnitt 2.12.*

### **A.1.2 Utdrag från SKI:s Allmänna råd om tillämpningen av föreskrifter med avseende på SKIFS 2002:1**

Statens kärnkraftsinspektions Allmänna råd om tillämpningen av föreskrifter med avseende på Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (SKIFS 2002:1)

*Nedan följer oavkortat 7, 8, 9 och 10 §§ och Bilagan i de allmänna råden till SKI FS 2002:1, dvs de delar som berör säkerhetsanalysen:*

#### **Till 7 §**

Bestämmelsen i denna paragraf kan uppfyllas genom att i säkerhetsanalysen enligt 9 § visa hur olika slag av brister i barriärer och barriärfunktioner varför sig inte kan leda till oacceptabla risker från spridning av radioaktiva ämnen från slutförvaret. Det bör kunna visas hur denna spridning begränsas av andra barriärer och barriärfunktioner än de som påverkats av de uppkomna bristerna. För att detta ska kunna uppfyllas kan flera barriärer vara nödvändiga, vilket särskilt gäller slutförvaring av använt kärnbränsle.

*Hantering i SR-Can: Detta kan bevisas t ex genom några av gränfallen i avsnitt 2.12.1.*

#### **Till 8 §**

Åtgärder kan vidtas under uppförande och drift för att genomföra eventuell övervakning av ett slutförvars integritet och dess barriärfunktioner efter förslutning. Sådana åtgärder kan också vidtas för att kunna upprätthålla kontroll av kärnämne (s k safeguards). Åtgärder kan också vidtas under uppförande och drift med främsta syfte att underlätta återtagande av deponerat kärnämne och kärnavfall från slutförvaret, antingen under driftperioden eller efter förslutning. Dessutom kan åtgärder vidtagas för att försvåra eller varna för intrång i slutförvaret. För dessa åtgärder gäller att det bör framgå av säkerhetsredovisningen för anläggningen enligt 9 § att åtgärderna antingen har en liten och försumbar inverkan på slutförvarets säkerhet, eller att åtgärderna medför en förbättring säkerheten, jämfört med fallet att åtgärderna ej vidtagits. Dessa bestämmelser är i överensstämmelse med bestämmelserna i Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter SSIFS 1998:1.

*Hantering i SR-Can: För närvarande är inga sådana åtgärder planerade för den konstruktion av förvar som ska analyseras i SR-Can.*

#### **Till 9 § och bilaga**

Ett slutförvars säkerhet efter förslutning analyseras kvantitativt främst genom att beräkna eventuell spridning av radioaktiva ämnen och hur de är fördelade i tiden för ett relevant urval av framtida möjliga händelseförlopp (scenarier). Syftet med säkerhetsanalysen är bl a

att visa att riskerna från dessa scenarier är acceptabla i förhållande till de krav på skydd av människors hälsa och miljön som har utfärdats av Statens strålskyddsinstitut (SSIFS 1998: 1). Säkerhetsanalysen bör också syfta till att ge en grundläggande förståelse av slutförvarets funktion i olika tidsrymder och till att identifiera krav på funktion och konstruktion av slutförvarets olika delar.

Ett *scenario* i säkerhetsanalysen omfattar en beskrivning av hur en given kombination av yttre och inre betingelser inverkar på slutförvarets funktion. Två grupper av sådana betingelser är:

- yttre betingelser i form av förhållanden, händelser och processer som verkar utanför slutförvarets barriärer; hit hör klimatförändringar och deras följdverkningar på slutförvarets omgivning såsom permafrost, nedisning, landsänkning och landhöjning samt effekter av mänsklig verksamhet,
- inre betingelser i form av förhållanden, händelser och processer som verkar inom slutförvaret; hit hör egenskaper, inklusive defekter, hos kärnämne, kärnavfall och tekniska barriärer och därtill knutna processer, samt egenskaper hos omgivande berg med därtill knutna processer.

Med utgångspunkt från en analys av sannolikheten för att scenarier av olika slag ska inträffa i olika tidsrymder bör scenarier med signifikant inverkan på slutförvarets funktion indelas i olika kategorier:

- huvudscenario,
- mindre sannolika scenarier,
- övriga scenarier eller restscenarier.

**Huvudscenariot** ska grunda sig på den troliga utvecklingen av yttre betingelser och realistiska eller där så är motiverat, konservativa antaganden om de inre betingelserna. Det bör omfatta framtida yttre händelser som har stor sannolikhet att inträffa eller som inte kan visas ha låg sannolikhet att inträffa under den tid som säkerhetsanalysen avser. Det bör vidare bygga på i största möjliga utsträckning trovärdiga antaganden om inre betingelser, inklusive underbyggda antaganden om förekomst av tillverkningsfel och andra ofullkomligheter, och som medger en analys av slutförvarets barriärfunktioner (det är t ex inte tillräckligt att alltid utgå ifrån täta avfallsbehållare under lång tid, även om detta skulle kunna visas vara det mest sannolika fallet). Huvudscenariot bör användas som utgångspunkt för en analys av hur osäkerheter inverkar (se nedan), vilket innebär att även analysen av huvudscenariot inrymmer ett antal beräkningsfall.

**Mindre sannolika scenarier** bör tas fram för bedömning av scenariosäkerhet (se även nedan). Hit hör varianter av huvudscenariot med alternativa händelse- och tidsförlopp samt scenarier som beaktar effekter av framtida mänsklig verksamhet såsom skador som tillfölgats barriärer. (Skador på människor som gör intrång i slutförvar belyses i restscenarier, se nedan.) Vid analys av mindre sannolika scenarier bör ingå analys av sådana osäkerheter som inte utvärderas inom ramen för huvudscenariot.

**Restscenarier** bör omfatta händelseförlopp och förhållanden som väljs och studeras oberoende av sannolikheter bl a för att belysa betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner. Till restscenarierna bör även höras fall för att belysa skador på människor som gör intrång i slutförvar liksom fall för att belysa konsekvenserna av ett ej förslutet slutförvar som lämnats utan övervakning.

**Hantering i SR-Can:** Definitionen och valet av scenarier diskuteras i avsnitt 2.10.

Brist på kunskap och andra ovissheter i beräkningsförutsättningarna (antaganden, modeller, data) benämnes i detta sammanhang osäkerheter<sup>5</sup>. Dessa osäkerheter kan indelas i

- scenariosäkerhet: osäkerhet i yttre och inre betingelser med avseende på slag, grad och tidsföljd,
- systemosäkerhet: osäkerhet i fullständighet vid beskrivningen av det system av förhållanden, händelser och processer som används vid analysen av både enskilda barriärfunktioner och funktionen hos slutförvaret i sin helhet,
- modellosäkerhet: osäkerhet i de beräkningsmodeller som används i analysen,
- parameterosäkerhet: osäkerhet i de parametervärden (indata) som används vid beräkningarna,
- rumslig variation hos de parametrar som används för att beskriva bergets barriärfunktioner (främst vad gäller vattenströmning, mekaniska och kemiska förhållanden).

Det finns ofta inga klara gränslinjer mellan de olika slagen av osäkerheter. Det viktiga är att osäkerheterna beskrivs och hanteras på ett konsistent och strukturerat sätt.

Bedömningen av osäkerheter är en viktig del av säkerhetsanalysen. Detta innebär att osäkerheter bör diskuteras och beaktas ingående såväl vid val av beräkningsfall, beräkningsmodeller och parametervärden som vid bedömning av beräkningsresultat.

**Hantering i SR-Can:** *Hanteringen av osäkerheter genomsyrar hela säkerhetsanalysen. En plan för hantering av osäkerheterna ges i avsnitt 2.14.*

De antaganden och beräkningsmodeller som används bör väljas omsorgsfullt med tanke på tillämpningen och valet motiveras genom diskussion av alternativ och med hänvisningar till vetenskapligt underlag. I de fall det råder tvekan om vilken modell som är tillämplig bör flera modeller användas för att belysa effekterna av osäkerheten i val av modell.

**Hantering i SR-Can:** *Denna fråga behandlas i processrapporten. Se vidare i avsnitt 2.7.1, under rubrikerna "Hantering i säkerhetsanalys" och "Osäkerheter".*

Både deterministiska och probabilistiska metoder bör användas så att de kompletterar varandra och på så sätt ger så allsidig riskbild som möjligt.

**Hantering i SR-Can:** *Detta diskuteras kortfattat i inledningen till avsnitt 2.12.*

**Sannolikheter för** att scenarier och beräkningsfall verkligen ska inträffa bör uppskattas så långt det är möjligt för att kunna beräkna risk. Sådana uppskattningar är inte möjliga att göra exakt. Uppskattningarna bör därför underbyggas genom att använda flera metoder, t ex bedömningar av flera oberoende experter. Detta kan göras t ex genom uppskattningar av när i tiden olika händelser kan förväntas ha inträffat.

**Hantering i SR-Can:** *Scenariosannolikheter diskuteras kortfattat i avsnitt 2.15.3. Detta är emellertid en fråga som måste beaktas ytterligare efter hand som SR-Can-projektet fortsätter.*

---

<sup>5</sup> Denna förklaring av termen osäkerhet äger logik endast på svenska, där samma ord används för att beteckna både säkerhet i meningen övertygelse och säkerhet i meningen frånvaro av fara.

Med utgångspunkt i scenarier som kan visas vara särskilt viktiga från risksynpunkt bör ett antal **konstruktionsstyrande fall** identifieras. Dessa fall bör tillsammans med annan information, t ex om tillverkningsteknik och kontrollerbarhet, användas för att underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper.

**Hantering i SR-Can:** Se avsnitt 2.12.1.

Speciellt för slutförvaring av kärnämne, t ex använt kärnbränsle, bör det kunna visas att kriticitet inte kan uppkomma i den konfiguration kärnämnet har från början. För omfördelning genom fysiska och kemiska processer av kärnämnet, och som kan leda till kriticitet, bör det visas att en sådan omfördelning är mycket osannolik.

**Hantering i SR-Can:** Se avsnitt 6.3.7.

Resultatet av beräkningar i säkerhetsanalysen bör innehålla sådan information och presenteras på ett sådant sätt att bedömning av säkerheten kan ske mot uppställda krav på ett överskådligt sätt.

**Hantering i SR-Can:** Detta är en övergripande krav på kvalitet i säkerhetsredovisningen som kommer att vara styrande för kompileringen av SR-Can-rapporten.

Giltigheten av använda förutsättningar, såsom modeller och parametervärden, bör styrkas t ex genom hänvisningar till vetenskaplig litteratur, särskilda utredningar och forskningsresultat, laboratorieexperiment i olika skalor, fältförsök och studier av naturliga fenomen (naturliga analogier).

**Hantering i SR-Can:** Motivering av modeller och parametervärden kommer i stor utsträckning att göras i processrapporten och datarapporten, se avsnitten 2.7 respektive 2.11. Användningen av naturliga analogier behandlas i avsnitt 2.12.4.

Vetenskapligt underlag, liksom gjorda bedömningar av experter, bör dokumenteras på ett spårbart sätt genom att noggrant ange referenser till vetenskaplig litteratur och annat underlag.

**Hantering i SR-Can:** Detta gäller mycket av dokumentationen till SR-Can, i synnerhet Processrapporten och datarapporten, se avsnitt 2.7 respektive 2.11. Exempel på liknande dokumentation finns i motsvarande rapporter till SR 97-analysen.

## **Till 10 §**

Den tid som säkerheten behöver bibehållas och visas bör framgå som en utgångspunkt för säkerhetsanalysen. Ett sätt att diskutera och motivera en sådan tidsbedömning är att utgå från farligheten hos slutförvarets innehåll av radioaktiva ämnen i jämförelse med farligheten hos radioaktiva ämnen i naturliga förekomster. Hänsyn bör dock också kunna tas till svårigheterna att göra meningsfulla analyser för extremt långa tidsrymder, bortom en miljon år, på annat sätt än att redovisa hur farligheten hos de radioaktiva ämnena i slutförvaret avtar med tiden.

För slutförvar avsedda för långlivat avfall kan säkerhetsanalysen behöva omfatta scenarier som tar hänsyn till större förväntade klimatförändringar, främst i form av kommande nedslagningar. Exempelvis bör man särskilt ta hänsyn till nästkommande fullständiga glaciationscykel som för närvarande beräknas vara i storleksordningen 100 000 år.

**Hantering i SR-Can:** Tidsskalan för SR-Can diskuteras i avsnitt 2.3.

För tider upp till 1 000 år efter förslutning ligger i enlighet med bestämmelserna i SSIFS 1998:1 dos och risk beräknade för dagens förhållanden i biosfären till grund för bedömningen av slutförvarets säkerhet och skyddsförmåga.

För längre tider kan bedömningen dessutom ske med dos som en av flera säkerhetsindikatorer. Detta bör beaktas både vid beräkningar och vid presentation av analysresultat. Exempel på sådana kompletterande säkerhetsindikatorer är de halter av radioaktiva ämnen från slutförvaret som kan byggas upp i mark och ytnära grundvatten eller det beräknade flödet av radioaktiva ämnen till biosfären.

**Hantering i SR-Can:** Användningen av alternativa säkerhetsindikatorer diskuteras i avsnitt 2.12.3.

(Jämför SSIFS 1998:1 och SSI:s kommentarer till dessa föreskrifter.)

## **A.2 SSI:s föreskrifter**

SSI har utfärdat föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall (SSI FS 1998:1), se avsnitt A.2.1.

SSI har dessutom utfärdat en rapport med bakgrund och författningskommentarer till SSI FS 1998:1. Utdrag ur det dokumentet finns i avsnitt A.2.2.

Vidare planerar SSI att ge ut Allmänna råd med avseende på tillämpning av SSI FS 1998:1.

Medan Föreskrifterna uppenbart har legal status beskrivs de Allmänna råden i § 1 i Författningssamplingsförordningen (1976:725) som: sådana generella rekommendationer om tillämpningen även författning som anger hur någon kan eller bör handla i ett visst hänseende.

### **A.2.1 SSI FS 1998:1**

Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall;

beslutade den 28 september 1998.

Statens strålskyddsinstitut föreskriver med stöd av 7 och 8 §§ strålskyddsförordningen (1988:293) följande.

**1 §** Dessa föreskrifter är tillämpliga på slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Föreskrifterna är inte tillämpliga på anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 19 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet.

#### **Definitioner**

**2 §** I dessa föreskrifter avses med

- *bästa möjliga teknik:* den effektivaste åtgärden för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen och utsläppens skadliga effekter på människors hälsa och miljön, och som inte medför orimliga kostnader,
- *intrång:* mänskligt handlande vid ett slutförvar som kan påverka dess skyddsförmåga,

- *optimering*: begränsning av stråldoser till människor så långt detta rimligen kan göras med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhälleliga faktorer,
- *skadeverkningar*: cancer (dödlig och icke-dödlig) samt ärftliga skador hos människor orsakade av joniserande strålning, i enlighet med stycke 47 till 51 i Internationella strålskyddskommissionens publikation nr 60, 1990,
- *skyddsförmåga*: förmåga att skydda människors hälsa och miljön från skadlig verkan av joniserande strålning,
- *slutligt omhändertagande*: hantering, behandling, transport, mellanlagring inför, och i samband med, slutlig förvaring samt den slutliga förvaringen,
- *risk*: produkten av sannolikheten att erhålla en stråldos och stråldosens skadeverkningar.

Termer och begrepp som används i strålskyddslagen (1988:220) och lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet har samma betydelse i dessa.

### **Helhetssyn m.m**

**3 §** Människors hälsa och miljön ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning, dels under den tid då de olika stegen i det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall genomförs, dels i framtiden. Det slutliga omhändertagandet får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som accepteras inom Sverige.

**4 §** Vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall skall optimering ske och hänsyn tas till bästa möjliga teknik.

Kollektivdos på grund av förväntat utläckage av radioaktiva ämnen under 1 000 år efter förslutningen av ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska beräknas som summan över 10 000 år av den årliga kollektivdosen. Beräkningen skall redovisas i enlighet med 10–12 §§.

***Hantering i SR-Can:** Utgående från SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SR 97 /SKI och SSI, 2001/ kan noteras att optimering och bästa möjliga teknik inte betraktas som frågor för en säkerhetsvärdering av myndigheter (avsnitt 3.3.6). SKB delar denna syn och dessa frågor kommer därför inte att behandlas i SR-Can.*

### **Skydd av människors hälsa**

**5 §** Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall skall utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst  $10^{-6}$  för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken<sup>6</sup>.

Sannolikheten för skadeverkningar till följd av en stråldos skall beräknas med de sannolikhetskoefficienter som redovisas i Internationella strålskyddskommissionens publikation nr 60, 1990.

<sup>6</sup> Med avseende på anläggningar i drift anges gällande begränsningar och instruktioner i Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter (SSI FS 1991:5, kompletterade 1997:2) med avseende på begränsning av utsläpp av radioaktiva ämnen från kärnkraftverk och Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter (SSI FS 1994:2, kompletterade 1997:3) med avseende på fysiologisk hälsa vid verksamheter som involverar joniserande strålning vid nukleära anläggningar.

*Hantering i SR-Can: Uppskattningar av risker och bedömning av förenlighet med kriterierna ovan är ett av huvudsyftena med SR-Can. Mycket av metodiken som redovisas i kapitel 2 är inriktad mot detta mål. Frågor som är direkt hänförliga till beräkning av risk diskuteras i avsnitt 2.15.*

## **Miljöskydd**

**6 §** Slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall skall genomföras så att biologisk mångfald och hållbart nyttjande av biologiska resurser skyddas mot skadlig verkan av joniserande strålning.

**7 §** Biologiska effekter av joniserande strålning i berörda livsmiljöer och ekosystem skall redovisas. Redovisningen skall bygga på tillgänglig kunskap om berörda ekosystem och ta särskild hänsyn till förekomst av genetiskt särpräglade populationer, såsom isolerade populationer, endemiska arter och utrotningshotade arter samt i övrigt skyddsvärda organismer.

*Hantering i SR-Can: Denna fråga berörs kortfattat i avsnitt 4.5, där det konstateras att ytterligare diskussion med eller råd från SSI krävs för att utveckla ett rimligt sätt att hantera frågan, med tanke på den begränsade kunskapen om inverkan av strålning på andra biota än människor.*

## **Intrång och tillträde**

**8 §** Ett slutförvar skall främst utformas med hänsyn till dess skyddsförmåga. Om åtgärder vidtas för att underlätta tillträde eller försvåra intrång skall effekterna på slutförvarets skyddsförmåga redovisas.

**9 §** Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar skall redovisas för de olika tidsperioder som anges i 11–12 §§. Slutförvarets skyddsförmåga efter intrång skall beskrivas.

*Hantering i SR-Can: Intrångsfrågor diskuteras i kapitel 7.*

## **Tidsperioder**

**10 §** En bedömning av ett slutförvares skyddsförmåga skall redovisas för två tidsperioder av sådana storleksordningar som framgår av 11–12 §§. Redovisningen skall innefatta ett fall, som utgår ifrån att de biosfärsförhållanden som råder vid tiden för ansökan om tillstånd för uppförande av slutförvaret inte förändras. Osäkerheter i gjorda antaganden skall redovisas och tas hänsyn till i bedömningen av skyddsförmågan.

*De första tusen åren efter förslutning av förvaret*

**11 §** För de första tusen åren efter förslutning skall bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön.

*Tiden efter de första tusen åren efter förslutning av förvaret*

**12 §** För tiden efter tusen år efter förslutning skall bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.

*Hantering i SR-Can: Hanteringen av olika tidsskalor diskuteras i rapporten, t ex i avsnitt 2.3 (Tidsskalor för analysen), 2.7.1 (tidsskalor för processbeskrivning), 2.9.7 (Tidsskala för*



förvarsutveckling), 6.4.2 (Den vidare utvecklingen av defekta förslutningar), 5.5 (Geokemi), 4.2 (Generell biosfärutveckling). Det återstår emellertid att fastställa hur de två tidsperioderna som nämns i föreskrifterna ska redovisas på en integrerad nivå. Faktorer att beakta är de olika tidsskalor på vilka olika fenomen rimligen kan prognostiseras och möjlig frånvaro av utsläpp från närområdet under de första 1 000 åren, vilket potentiellt minskar behovet av en detaljerad beskrivning av biosfären för denna tidsskala.

## Undantag

13 § Om det finns särskilda skäl får Statens strålskyddsinstitut meddela undantag från dessa föreskrifter.

### A.2.2 Utdrag från SSI:s dokument Bakgrund och författningskommentarer med avseende på SSI FS 1998:1

*Hantering i SR-Can: Den detaljerade hanteringen i SR-Can diskuteras inte i detta dokument. SSI har uppmärksamats på vissa frågor som fordrar klargörande. När dokumentet Allmänna råd med avseende på SSI FS 1998:1 är tillgängligt från SSI, kommer hanteringen av dessa råd i SR-Can att etableras och dokumenteras.*

## 2.4 Skydd av människors hälsa (§ 5)

### 2.4.1 Allmänt

Strålning från rymden, marken och från de i den egna kroppens naturligt förekommande radioaktiva ämnena ger människan en dos av i storleksordningen 1 mSv (millisievert) per år. Markstrålningen varierar och människan utsätts också för annan strålning från t ex radon i inomhusluft och från medicinsk användning av strålning vid undersökning och behandling. Medelvärdet för individdosen i Sverige, från alla källor, är i storleksordningen 4 mSv per år.

Den av ICRP rekommenderade dosgränsen för individer ur allmänheten till följd av verksamhet med strålning är 1 mSv per år. Denna rekommendation har fått legal status inom EU genom direktivet 96/29/EURATOM. Detta skall vara implementerat i medlemsländerna senast i maj år 2000. I Sverige föreskrevs dock denna dosgräns redan 1990 genom SSI:s föreskrifter om dosgränser vid verksamhet med joniserande strålning (SSI FS 1989:1).

En tillståndsinnehavare kan inte ansvara för konsekvenser av utsläpp från andra anläggningar än sina egna. För att ta hänsyn till att utsläpp från flera anläggningar kan drabba en och samma person kan särskilda dosrestriktioner bestämmas för enskilda verksamheter. Dosrestriktionen sätts så att enskilda inte skall erhålla stråldoser överstigande dosgränsen, dvs 1 mSv per år för individer ur allmänheten, även om flera källor skulle bidra till exponeringen. SSI har således begränsat utsläpp från kärnkraftverk så att dosen normalt inte skall överstiga en tiondel av dosgränsen, dvs 0,1 mSv per år (SSI FS 1991:5). Det innebär att tillståndsinnehavaren måste visa, med hjälp av radioekologiska spridningsmodeller, att individer ur allmänheten inte utsätts för högre stråldoser än 0,1 mSv per år till följd av utsläpp från den egna verksamheten. Restriktionen avser dos till den grupp människor som på grund av ålder, levnadsvanor och vistelseort kan få den högsta stråldosen, den s k kritiska gruppen (ICRP 43).

Även om tio anläggningar fanns i en och samma region vore det osannolikt att samtliga anläggningar skulle ha identisk kritisk grupp. Restriktionen en tiondel av 1 mSv/år innebär därför i sig en hög skyddsnivå.

#### **2.4.2 Skydd av människors hälsa från anläggningar där verksamhet pågår**

För sådana framtida anläggningar som kan komma att behövas för att omhänderta avfall eller använt kärnbränsle, exempelvis en anläggning för inkapsling av använt kärnbränsle, gäller samma utsläppsregler som för drift av kärnkraftverk, dvs dos till kritisk grupp bör inte överstiga 0,1 mSv per år. Dessa regler är också tillämpliga för verksamheten vid ett slutförvar innan detta förslutits. Detta konstateras hänvisningen i fotnoten till 5 §. SSI arbetar f n med en översyn av den relevanta föreskriften, SSI FS 1991:5. Personstrålskydd vid arbete i kärntekniska anläggningar täcks av SSI FS 1994:2, vilken också hänvisas till i fotnoten till 5 §.

För dessa verksamheter gäller, liksom för verksamhet vid kärntekniska anläggningar, att åtgärder fortlöpande kan vidtas för att kontrollera utsläppen, inklusive åtgärden att helt stoppa verksamheten.

#### **2.4.3 Skydd av människors hälsa från ett förslutet slutförvar – riskbegreppet och individskyddets nivå**

Till skillnad från verksamheter som pågår är framtida utsläpp från ett förslutet slutförvar och de skador som då kan uppkomma hypotetiska, s k potentiell exponering (ICRP publikation 64). Detta medför svårigheter att använda kriterier som, likt de för de pågående verksamheterna, är baserade på ”verkliga” doser till t ex kritisk grupp. Dessa svårigheter beror på osäkerheten om ett utflöde kommer att inträffa och vilka följdverkningar det i så fall skulle få. En analys innebär alltid osäkerheter om huruvida och när ett utsläpp inträffar, vilka spridningsvägar de utsläppta radionukliderna har i geosfären och i biosfären, samt de exponerade människornas geografiska lokalisering i förhållande till utflödesområdet och deras kost- och levnadsvanor.

På grund av de speciella osäkerheter som råder i samband med potentiell exponering, har SSI valt att ange individskyddskriterierna (för människor) i form av årlig risk för skadeverkningar till följd av joniserande strålning. Användning av begreppet ”risk” anknyter till annat skyddsarbete och underlättar en sammanhållen samhällelig bedömning av belastningar på individer ur allmänheten.

Den risk som här avses gäller ett av människan ostört slutförvar. Frågan om möjligheten av olika sorts intrång i slutförvaret kommenteras under avsnitt 2.6 Intrång

Det använda begreppet ”risk” definieras i dessa föreskrifter som sannolikheten för skadeverkan (dödlig och icke-dödlig cancer samt ärftliga skador) till följd av utflöde från slutförvaret, med hänsyn tagen till sannolikhet för att individen får en dos såväl som sannolikheten för skadeverkan till följd av dosen. Vid bedömning av skadeverkan till följd av strålning har SSI utgått från Internationella strålskyddskommissionens definition av detriment (ICRP 60), vilket närmare beskrivs i 2 §, samt i avsnitt 2.2.4 Skadeverkningar.

Ett slutförvar skall utformas så att inga ytterligare åtgärder behöver vidtas efter förslutning för att förhindra eller begränsa utflödet av radioaktiva ämnen från slutförvaret. Institutionell kontroll och kunskap om slutförvarets lokalisering i en avlägsen framtid kan inte förutsättas.

Kravet på en hållbar utveckling i Riodeklarationen 1992 innebär även att utrymme måste lämnas till nyttjande av andra energikällor i framtiden, vilka kan vara av miljöfarlig natur. Om en energikälla som används i femtio år kan inkräkta på utrymmet för accepterat skadlig påverkan från energiproduktion under tusentals år, följer det att källan måste regleras med mycket stränga krav. Påverkan från slutförvaret måste således vara i balans med den tid som energikällan utnyttjas. Man kan även göra antagandet att det i en viss region fanns 10 slutförvar, vart och ett med ett innehåll motsvarande det som idag förväntas för det svenska slutförvaret. I så fall skulle hypotetiska utflöden från de olika slutförvarerna kunna överlappa varandra och ge en större påverkan av berörda i regionen. Även andra former av framtida energiproduktion kan på samma sätt medföra en större belastning.

För att ta hänsyn till samverkan mellan olika framtida riskkällor, av vilka slutförvaret är en, ställer SSI kravet att risken från slutförvaret för personer som är representativa för en utsatt grupp skall vara lägre än risken som gäller för kritisk grupp vid kärntekniska anläggningar i drift. SSI har därför beslutat att i föreliggande föreskrifter ange att den årliga risken för skadeverkningar till följd av slutförvaret högst får bli  $10^{-6}$ , dvs en på miljonen. Med ICRP:s sannolikhetskoefficient gällande cancer och ärftliga skador på 0,073 per sievert motsvarar denna risknivå en årlig förväntad dos av cirka 15  $\mu$ Sv.

#### 2.4.4 Förutsättningar för beräkningar

Som diskuterats ovan är risk produkten av sannolikheten att erhålla en stråldos och stråldosens skadeverkningar. Rent matematiskt kan detta uttryckas som:

$$\gamma \int P(D)DdD$$

där  $P(D)$  är den årliga sannolikheten för individen att belastas med en dos  $i$  dosintervallet  $(D, D+dD)$ , integrerat över tänkbara doser, multiplicerad med sannolikheten för skadeverkning per dosenhet,  $\gamma$  (0,073 per Sv).

Det är i många fall i möjligt att beräkna en "exakt" risk med ledning av den angivna formeln. I stället måste risken uppskattas utifrån den riskbild som erhålls genom att väga samman konsekvenser och sannolikheter för olika händelseförlopp. Med riskbild avses här en redovisning av beräknade eller på annat sätt uppskattade konsekvenser och sannolikheter för ett relevant urval möjliga händelseförlopp (scenarier). Konsekvenserna ska beräknas eller uppskattas så att de täcker in osäkerheterna i de antaganden och data som ligger till grund för beräkningarna eller uppskattningarna. Urvalet av scenarier bör vara sådant att de tillsammans ger en allsidig bild av de risker som förknippas med slutförvaret.

Användning av risk som kriterium innebär således inte att dosberäkningen kan utelämnas i redovisningen, utan samtliga beräkningssteg skall redovisas. Föreskrifternas riskmått kan, som nämnts ovan, omvandlas till ett väntevärde för dos, med den av ICRP angivna faktorn 0,073 per Sv.

Sökandens ansvar vad gäller riskbegränsning avser en större grupp som erhåller dos från slutförvaret. Det måste säkerställas att representativa individer ur denna grupp inte utsätts för risker större än  $10^{-6}$  per år. Gruppen är inte nödvändigtvis geografiskt avgränsad utan består av dem som får högst belastning från flera framtida källor.

För utsläpp i en avlägsen framtid kan endast "hypotetiska" personer komma i fråga för beräkningar. Den hypotetiska gruppen kan inte ersättas av en befintlig grupp av människor vars levnadssätt kan beskrivas, och för vilka både mätningar och beräkningar kan utföras.

Vid en beräkning av ett hypotetiskt dosutfall i en avlägsen framtid är det rimligt att hänsyn tas till fördelning med avseende på ålder och kön, men därutöver tillför begreppet grupp inte resonemanget mer än medelvärde av dos och risk, beräknad med hänsyn till ålder och kön, för en hypotetisk person.

I ICRP:s Publikation 43 föreslås att i vissa fall (då kvoten mellan genomsnittsdosen till gruppen och dosbegränsningen är mindre än en tiondel) skall gruppen anses bestå av individer, som erhåller doser vilkas storlek ryms inom en faktor tio, dvs med en faktor tre kring båda sidor om medeldosen. I termer av risk innebär det samma faktor i spännvidd. I detta sammanhang har SSI istället valt att låta den tänkta, regionalt berörda gruppen, ha en tio gånger större spännvidd i risk, dvs en faktor 100.

Om sökanden önskar göra beräkningar för en individ som bedöms vara högt belastad, är det acceptabelt att utföra beräkningarna för en individ som representerar den högre nivån inom intervallet, i stället för en individ som är representativ för hela gruppens belastning. Därmed begränsas risken för den i föreskrifternas mening representativa individen till en nivå som är tio gånger lägre. Representativiteten i antagna levnads- och konsumtionsmönster skall också belysas med avseende på sannolikhet.

Doser högre än 1 mSv/år, som i och för sig kan tänkas förekomma för vissa scenarier, t ex vid ett intrång i slutförvaret, innebär att den av ICRP rekommenderade gränsen för individer ur allmänheten överskrids. Sådana situationer skall redovisas och kommer att bedömas separat.

## **2.4.5 Sammanfattning av individskydd**

- Begränsningen av risk har fastställts med tanke på att utrymme skall finnas för framtida verksamhet såsom energiproduktion.
- Begränsningen gäller en större grupp av individer som bedöms ha en spridning med en faktor hundra mellan lägsta och högsta risk, till följd av ett utflöde från slutförvaret.
- Ett slutförvar skall planeras så att dos till representativa personer i den mest utsatta gruppen från ett utflöde från slutförvaret, inte väntas leda till risker överstigande  $10^{-6}$ .

## **2.5 Miljöskydd (§§ 6–7)**

### **2.5.1 Allmänt**

I strålskyddslagen anges i 1 § att ”syftet med denna lag är att människor, djur och miljö skall skyddas mot skadlig verkan av strålning”. Detta innebär en utvidgning av tillämpningsområdet mot tidigare; i proposition 1987/88:88 Ny strålskyddslag m m sägs att en ny strålskyddslag inte skall ”som den nuvarande vara begränsad till huvudsakligen ett skydd för människan. Även effekter på djurlivet och växterna bör inrymmas i lagen, liksom skydd av miljön i övrigt”. Vad ”skydd av miljön i övrigt” betyder framgår inte av strålskyddslagen. Enligt SSI:s mening bör det i detta sammanhang förstås som förutsättningar för biologiskt liv i alla dess former och organisationsnivåer, dvs skydd av miljön syftar till skydd av organismer.

Den inom strålskyddet hittills rådande uppfattningen, baserad på ICRP:s publikationer 26 och 60, har varit att organismer i miljön har varit skyddade ifall förutsättningar för skydd av människan har blivit uppfyllda

(”The Commission believes that the standard of environmental control needed to protect man to the degree currently thought desirable will ensure that other species are not put at risk”, ICRP 60 §16)

Sedan ICRP m fl gjort dessa bedömningar har inriktningen inom miljöskyddsområdet i övrigt förändrats, i huvudsak som ett resultat av Riokonferensen om miljö och utveckling 1992. Fokusering sker nu på begrepp som ”biologisk mångfald”, ”biologiska resurser” och ”hållbart nyttjande”. Dessa frågor har hittills rönt begränsad uppmärksamhet inom strålskyddet.

Konventionen om biologisk mångfald (prop 1992/93:227) definierar begreppet biologisk mångfald som ”variationsrikedomen bland levande organismer av alla ursprung, inklusive bland annat landbaserade, marina och andra akvatiska ekosystem och de ekologiska komplex i vilka de ingår; detta innefattar mångfald inom arter, mellan arter och av ekosystem”. I konventionen poängteras således betydelsen av alla organismer som bidrar till ekosystemets struktur. Omfattningen sträcks även ut till kulturväxter, boskap, m m.

Betydelsen av bevarande av den biologiska mångfalden har betonats av regeringen (prop 1993/94:30): ”Aktionsplaner eller handlingsprogram för bevarande av biologiskt mångfald bör utarbetas dels av Statens naturvårdsverk, för uppföljning av miljömål och för en samlad bedömning av insatsbehoven inom hela området, dels av resp. sektorsmyndighet som sektorsvisa konkreta planer eller program”. SSI har deltagit i den översyn av de nationella miljömålen som Naturvårdsverket har genomfört för regeringens räkning, bl a som ett underlag för 1998 års miljöproposition (prop 1997/98:145).

Riodokumentet betonar att miljön och naturen skall ses som resurser som på ett hållbart sätt skall kunna nyttjas av lokala, nationella eller internationella samfund, nu och i framtiden. Med andra ord skall dagens nyttjande inte äventyra framtida generationers nyttjande av resurserna. De biologiska resurserna är bl a avhängiga av den biologiska mångfalden, t ex i form av genetiskt material av potentiellt värde för förädling med avseende på produktivitet och kvalitet. Nyttjandet av biologiska resurser sker bara i vissa sammanhang utan mellanhänder, dvs där andelen självhushållning är stor. I de flesta fall nyttjas de biologiska resurserna via en marknad. Det medför att marknadens värderingar kommer att utgöra en del av resursbegreppet. Man kan tänka sig fall där produkters marknadsvärde försämras av kontamination även där den radiologiska signifikansen är obetydlig, vilket kan behöva tas i beaktande i beskrivningar av avfallshandlingens konsekvenser.

## 2.5.2 Kommentarer till föreskrifterna

Avsikten med 6–7 §§ är att begränsa effekter av joniserande strålning på i miljön förekommande organismer, nu och i framtiden, och att därmed behålla möjligheten för ett hållbart nyttjande av biologiska resurser.

Denna ambition framgår av 6 § föreskriften, där det anges att det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall inte, ur strålningssynpunkt, får skada biologisk mångfald eller hållbart nyttjande av biologiska resurser. Det skall dock betonas att biologisk mångfald är föränderlig i tiden av naturliga orsaker; ambitionen kan således inte vara att ”frysa” nuvarande tillstånd.

I 7 § anges att redovisningen skall avse biologiska effekter av joniserande strålning. Skyddet kan inte säkerställas genom att enbart icke-biologiska parametrar beaktas, t ex olika slags säkerhetsindikatorer. För att kunna bedöma om skyddsmålen uppfylls krävs att de biologiska effekterna redovisas, vilket sannolikt kräver en uppskattning av dosbidraget till relevanta organismer eller organismgrupper.

Redovisningen skall gälla för organismer i berörda livsmiljöer (habitat, dvs den för speciella organismer eller organismgrupper relevanta miljön) och ekosystem. Av speciellt intresse är sådana organismer som är genetiskt särpräglade eller potentiellt av särskild vikt för de ekologiska processerna, den biologiska mångfalden och de biologiska resurserna. Hit hör bl a randpopulationer, isolerade populationer med begränsat genutbyte med artens huvudsakliga utbredningsområde, endemiska arter (arter med ett geografiskt isolerat utbredningsområde) och utrotningshotade arter (dvs där individantalet utgör en särskild genetisk begränsning). Med begreppet i övrigt skyddsvärda organismer förstås organismer som ur biologisk, kulturell eller ekonomisk synpunkt är värda att särbehandla.

I 7 § sägs vidare att redovisningen skall bygga på tillgänglig kunskap, dvs existerande dokumentation eller dokumentation som kan upprättas i samband med lokaliseringen. Därav följer att en detaljerad analys bara kan göras i det korta tidsperspektivet. För långa tidsperspektiv efter förslutning av ett slutförvar finns ingen möjlighet att förutse vilka genetiskt särpräglade organismer som kan förekomma. En bedömning får i sådana fall göras enligt de allmänna riktlinjer som framgår av 10–12 §§ föreskriften, se också avsnitt 2.7 Tidsperioder.

Det framgår indirekt av 6–7 §§ att SSI för närvarande inte anser det möjligt att i föreskriftsform redovisa kvantitativa kriterier för miljöskydd. Detta innebär att försiktighetsprincipen skall tillämpas, i enlighet med Riodeklarationen. FN:s vetenskapliga strålningskommitté, UNSCEAR, har nyligen sammanställt information (UNSCEAR 1995) om strålningskänslighet hos olika organismer, baserade på data från experiment och observerade effekter i den naturliga miljön. Inom SSI pågår arbete med att utveckla miljöskyddskriterier från befintlig dokumentation, baserade på ett ekotoxikologiskt arbetssätt.

### **2.5.3 Sammanfattning av miljöskydd**

- Biologisk mångfald och uthålligt nyttjande av biologiska resurser skall skyddas mot skadliga effekter av strålning.
- Analys och bedömning skall göras av biologiska effekter i miljön, där så är möjligt med särskild hänsyn till genetiskt särpräglade och i övrigt skyddsvärda organismer.

## **2.6 Intrång (§§ 8–9)**

### **2.6.1 Överväganden**

En viktig utgångspunkt för diskussioner om krav kopplade till intrång är att samhället har ansvar för sina egna medvetna handlingar. Det är därför inte nödvändigt, i samband med en ansökan, att belysa frågor om avsiktligt och av samhället sanktionerat intrång i ett avfallsförvar. Med intrång avses i det följande oavsiktligt mänskligt handlande i slutförvaret eller i dess omedelbara närhet, så att slutförvarets skyddsförmåga försämras.

För ett slutförvar skall en redovisning ske av följderna av ett intrång eller annan störning i slutförvaret eller dess närhet. Det väsentliga är inte att redovisa den händelsekedja som leder fram till intrånget, utan att belysa slutförvarets kvarhållande förmåga efter ett intrång, vilket framgår av 8–9 §§ föreskriften.

För det fall sökanden föreslår mellanlagring under en längre period före slutförvaring skall frågan om intrång i mellanförvaret också belysas. Intrång i ett mellanlager innebär ett avsiktligt brott mot säkerhetsbestämmelser och kan inte jämföras med ett misstag vid t ex tunnelborrning i en avlägsen framtid. När det gäller ett intrång i ett mellanlager är både händelsekedjan och följden av intrånget av intresse. SSI vill betona att mellanlagring över långa tidsperioder inte kan accepteras som en plan för en slutlig lösning.

Frågor om intrång kommer av SSI att hanteras skilt från diskussionen om det ostörda slutförvaret. Vad som sagts om helhetssyn och optimering i 4 § och i avsnitt 2.3.3 skall således inte gälla intrång i slutförvar. Bedömda sannolikheter för mänskligt intrång i en framtid är så osäkra att SSI inte önskar åsidosätta det ostörda slutförvarets säkerhet.

Däremot kan det vara klagörande att utföra separata studier av sannolikheten för intrång, t ex för att belysa tänkbara motåtgärder. Med tanke på samhällets ansvar för bevarande av information i olika arkiv om slutförvaret i långa tider efter förslutning, kan sådana studier i myndigheternas regi, och utförda från myndigheternas särskilda utgångspunkter, också bli aktuella.

Åtgärder kan även planeras och genomföras av sökanden för att underlätta framtida tillträde, t ex för inspektion, reparation eller återtagande. Även i detta fall ställer SSI krav på redovisning av åtgärdernas påverkan på skyddsförmågan.

Verksamheten i samband med avfallshantering skall dokumenteras. Särskilt gäller detta information om ett slutförvar, dess läge, innehåll och konstruktion m m. SSI har i en särskild föreskrift (SSI FS 1997:1) behandlat dokumentation och arkivering. Den dokumentation som idag finns hos myndigheter och hos tillståndsinnehavare har upprättats för andra ändamål än att underlätta för en läsare i en avlägsen framtid. I samband med SSI:s ställningstaganden till en ansökan om uppförandet av ett slutförvar kan ytterligare anvisningar och krav komma att ställas.

## **2.6.2 Sammanfattning av intrång**

- Om åtgärder planeras för att försvåra intrång eller underlätta tillträde skall konsekvenserna för slutförvarets skyddsförmåga redovisas.
- Följderna av ett intrång skall bedömas utgående från slutförvarets förmåga att kvarhålla avfallet efter ett intrång

## **2.7 Tidsperioder (10–12 §§ )**

### **2.7.1 Överväganden**

Människors hälsa och miljön måste ges ett adekvat skydd även i mycket långa tidsperspektiv. SSI ansluter sig till uppfattningen att doser i framtiden inte skall bedömas som mindre betydelsefulla än doser som belastar människor idag. Samma förhållande gäller för skydd av miljön.

Grunden till att skilda krav ställs på redovisningen för olika tidsperioder är dels att avfallets farlighet avtar med tiden, dels svårigheterna att göra tillförlitliga kvantitativa analyser av strålskyddet för en avlägsen framtid. Det senare gäller särskilt hur biosfären eventuellt kommer att påverkas av samhällsutvecklingen. En diskussion måste därför föras om slutförvarets förmåga att skydda människors hälsa och miljön från skadlig verkan av joniserande strålning (skyddsförmågan) under olika tidsperioder.

Den absolut viktigaste perioden med hänsyn till avfallets farlighet är de första tusen åren efter förslutning av ett slutförvar. För denna period anser SSI att godtagbara bedömningar av slutförvarets skyddsförmåga kan göras på grundval av kvantitativa analyser av ett scenario som omfattar den troliga utvecklingen av yttre betingelser (t ex klimatförändringar) och realistiska antaganden om de inre betingelserna (t ex funktionen hos tekniska barriärer).

Valet av tusenårsperspektivet har även en legal anknytning. Krav ställs normalt i samhället över tidsperioder kortare än hundra år, men det finns också exempel på hundraårsperspektiv i vissa fall. Vissa legala aspekter i ett långtids- och historiskt perspektiv belyses i SSI-rapport 94-11. SSI menar att tusenårsperspektivet i detta sammanhang utgör en rimlig övre gräns för att skilja tidsperioder som är möjliga att knyta till befintliga rättstraditioner från tidsperioder som tillhör en okänd framtid.

Den som söker tillstånd för slutförvaring måste även redovisa vad som kan hända med ett slutförvar i ett längre tidsperspektiv, t ex i en framtid bortom de första tusen åren efter förslutning. En del mycket långsamma förlopp, såsom utveckling av geologiska formationer, studeras vetenskapligt för långa tidsförlopp. Även andra aspekter eller delsystem av ett slutförvar kan studeras med trovärdighet under tider som går långt utanför det tidigare nämnda tusenårsperspektivet. Sådana studier innebär inte att slutförvarets hela skyddsförmåga kan förutses, men de kan ge ett värdefullt underlag utan att utgöra en förutsägelse av stråldoser till levande varelser.

För att kunna bedöma hur slutförvarets skyddsförmåga under dessa långa tider behöver ett relevant urval tänkbara förlopp (scenarier) för utvecklingen av slutförvarets egenskaper och omgivning beskrivas och analyseras, samt en beskrivning ges som illustrerar olika tänkbara förlopp för utvecklingen av biosfären och som kopplas till slutförvaret och dess omgivning. Syftet är att beskrivningarna ska ge en bild av slutförvarets förmåga att skydda människors hälsa och miljön under olika förutsättningar, dvs att ge en allsidig belysning av dess robusthet. Så långt det är möjligt bör dessa beskrivningar utgå från kvantitativa beräkningar.

Enligt 10 § ska studierna alltid inkludera ett fall som bygger på dagens (vid tiden för ansökan) biosfärsförhållanden. Det ligger i begreppet att hänsyn också tas till kända trender såsom landhöjning, vilket är viktigt för t ex SFR. Det är angeläget att återigen betona att detta inte ger en prediktion av faktiska doser eller miljökonsekvenser i en avlägsen framtid (mer än tusen år). Slutförvarets förmåga att innesluta avfallet kan istället bedömas med hjälp av olika säkerhetsindikatorer. Ett exempel på säkerhetsindikator är hypotetisk dos till människa, beräknad med en matematisk modell för spridning efter ett hypotetiskt utflöde från ett slutförvar. För en avlägsen framtid kan vi inte utgå från att beräkningsmodellerna beskriver biosfärsförhållande och levnadsvanor korrekt, men den beräknade stråldosen kan ändå användas som en indikator på slutförvarets förmåga att fylla sitt syfte. En utformning av ett slutförvar som indikerar en lägre dos kan således bedömas vara bättre än en annan utformning som indikerar högre dos, utan att dosen har ett bestämt prediktivt värde.

För de olika tidsperioderna ska alltid osäkerheter redovisas (10 §). Detta avser osäkerheter i t ex beräkningsmodeller, ingående data och parametervärden. Det ska också framgå på vilket sätt och i vilken utsträckning osäkerheterna påverkar bedömningen slutförvarets skyddsförmåga.



### **2.7.2 Sammanfattning av tidsperioder**

- Bedömningar av slutförvarets skyddsförmåga (förmåga att skydda hälsa och miljö) skall redovisas för två perioder: i) fram till storleksordningen tusen år in i framtiden, ii) mycket långa tidsperioder.
- För perioden fram till de första tusen åren efter förslutning skall beräkningar göras av riskutfall. För långa tidsperioder skall bedömning av skyddsförmågan baseras på beskrivningar och analyser av tänkbara förlopp för slutförvaret och dess omgivning. Kunskap om delsystem skall redovisas även om biosfären och andra förhållanden inte kan beskrivas med samma tillförlitlighet.
- Redovisningen för olika tidsperioder skall innefatta ett fall som bygger på nutida biosfärsförhållanden.