

Djupförvar för använt kärnbränsle

SR 97 – Säkerheten efter förslutning

November 1999

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



Djupförvar för använt kärnbränsle

**SR 97 – Säkerheten
efter förslutning**

November 1999

Innehåll

Del I

Sammanfattning	13
1 Syften och förutsättningar	17
1.1 Varför SR 97?	17
1.2 Syften	18
1.3 Avgränsningar	19
1.4 Rapportstruktur	20
1.5 Referenser	21
2 Säkerhetsmål och acceptanskriterier	23
2.2.1 SSI:s föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle	23
2.2.2 SKI:s remissversion av föreskrifter för säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall	25
3 KBS-3-systemet, säkerhetsprinciper	27
3.1 Säkerhetsprinciper för ett djupförvar	27
3.2 Förvarets primära funktion – isolering	28
3.3 Förvarets sekundära funktion – fördröjning	29
3.4 Spädning och spridning	29
3.5 Hur länge ska förvaret fungera?	30
3.6 Referenser	31
4 Metodik	33
4.1 Vad är en säkerhetsanalys?	33
4.1.1 Systemperspektiv	33
4.1.2 Säkerhetskriterier och tilltro	34
4.1.3 Säkerhetsanalysens moment	35
4.2 Systembeskrivning	36
4.2.1 Systemgräns	36
4.2.2 Fyra systemdelar	36
4.2.3 THMC interaktioner och processer	37
4.2.4 Vilka processer?	39
4.2.5 Dokumentation av processer	40
4.2.6 Variabler	40
4.2.7 THMC-diagram	41
4.2.8 Allmängiltigt format	43
4.3 Initialt tillstånd	43
4.4 Scenarieval	44
4.4.1 Scenarier i SR 97	45
4.4.2 Sannolikhet att ett givet scenario inträffar; varianter	45
4.5 Analys av valda scenarier	46
4.5.1 Analys av omgivningsförhållanden	46
4.5.2 Basscenariot	47
4.5.3 Kapseldefektscenariot	48
4.5.4 Övriga scenarier	48

4.6	Hantering av osäkerheter	48
4.6.1	Fullständigheten i systembeskrivning och scenarieval	49
4.6.2	Kvantifiering av initialtillstånd	50
4.6.3	Konceptuell osäkerhet	50
4.6.4	Osäkerheter i indata för beräkningar av radionuklidtransport	51
4.6.5	Probabilistiska beräkningar	52
4.7	Kommande arbete	55
4.8	Referenser	56
5	Systembeskrivning; processer och variabler	57
5.1	Inledning	57
5.2	Överblick av KBS-3-systemet	57
5.3	Bränsle	58
5.3.1	Allmänt	58
5.3.2	Överblick av variabler	60
5.3.3	Överblick av processer	60
5.4	Gjutjärnsinsats/kopparkapsel	63
5.4.1	Allmänt	63
5.4.2	Överblick av variabler	64
5.4.3	Överblick av processer	64
5.5	Buffert/återfyllning	66
5.5.1	Allmänt	66
5.5.2	Överblick av variabler	67
5.5.3	Överblick av processer	68
5.6	Geosfär	70
5.6.1	Allmänt	70
5.6.2	Överblick av variabler	70
5.6.3	Överblick av processer	72
5.7	Säkerhetskriterier	74
5.8	Fullständigheten i systembeskrivningen	77
5.9	Referenser	78
6	Förvarets initiala tillstånd	79
6.1	Inledning	79
6.1.1	Starttidpunkt	79
6.2	Bränsle	80
6.2.1	Geometri	80
6.2.2	Strålintensitet	80
6.2.3	Temperatur	81
6.2.4	Radionuklidinventarium	81
6.2.5	Materialsammansättning	83
6.2.6	Vattensammansättning	83
6.2.7	Gassammansättning	84
6.2.8	Hydrovariabler	84
6.2.9	Mekaniska spänningar	84
6.3	Gjutjärnsinsats/kopparkapsel	85
6.3.1	Geometri	85
6.3.2	Strålintensitet	86
6.3.3	Temperatur	86
6.3.4	Materialsammansättning	86
6.3.5	Mekaniska spänningar	86

6.4	Buffert/återfyllning	87
6.4.1	Buffertgeometri	87
6.4.2	Porgeometri (porositet)	87
6.4.3	Strålintensitet	87
6.4.4	Temperatur	88
6.4.5	Smektithalt	88
6.4.6	Vattenhalt	88
6.4.7	Gashalter	89
6.4.8	Hydrovariabler	89
6.4.9	Svälltryck	89
6.4.10	Smektitsammansättning	90
6.4.11	Porvattensammansättning	90
6.4.12	Föroreningshalter	90
6.5	Geosfär	91
6.5.1	Starttidpunkt för geosfärsbeskrivningen	91
6.5.2	Allmänt om platserna i säkerhetsanalysen	92
6.5.3	Förvarsgeometri/rand	95
6.5.4	Sprickgeometri och genomsläpplighet	98
6.5.5	Temperatur	111
6.5.6	Grundvattenflöde	111
6.5.7	Grundvattentryck	111
6.5.8	Gasflöde	112
6.5.9	Bergspänningar	112
6.5.10	Matrismineral	116
6.5.11	Sprickmineral	117
6.5.12	Grundvattensammansättning	117
6.5.13	Gassammansättning	118
6.5.14	Konstruktions- och strömaterial	118
6.6	Biosfären	119
6.6.1	Aberg	119
6.6.2	Beberg	120
6.6.3	Ceberg	121
6.7	Referenser	122
7	Val av scenarier	127
7.1	Inledning	127
7.2	Förutsättningar för valda scenarier	129
7.2.1	Basscenariot	129
7.2.2	Kapseldefektscenariot	130
7.2.3	Klimatscenariot	130
7.2.4	Tektonik/jordskalvsscenario	130
7.2.5	Scenarier baserade på mänskliga handlingar	130
7.3	Fullständighet/täckningsgrad i scenariovalet	131
7.3.1	Analys baserad på systembeskrivningen	131
7.3.2	Systematisk dokumentation av egenskaper, händelser och processer	132
7.3.3	Jämförelse med andra organisationer	133
7.3.4	Kommande arbete	133
7.3.5	Slutsats	133
7.4	Referenser	134

8	Basscenario	135
8.1	Inledning	135
8.2	Initialtillstånd	135
8.3	Randförhållanden	135
	8.3.1 Klimat	136
	8.3.2 Biosfärens utveckling	136
8.4	Överblick av processer och beroenden	138
8.5	Strålrelaterad utveckling	139
	8.5.1 Överblick	139
	8.5.2 Aktivitet och farlighet	140
	8.5.3 Resteffekt	141
	8.5.4 Gamma- och neutronintensiteter	141
	8.5.5 Tilltro	144
	8.5.6 Slutsatser	144
8.6	Termisk utveckling	144
	8.6.1 Överblick	144
	8.6.2 Termisk utveckling i buffert och geosfär	146
	8.6.3 Tilltro	150
	8.6.4 Slutsatser	151
8.7	Hydraulisk utveckling	152
	8.7.1 Överblick	152
	8.7.2 Hydraulisk utveckling i geosfären vid Aberg, Beberg och Ceberg	154
	8.7.3 Hydromekanisk utveckling i buffert/återfyllning	161
	8.7.4 Tilltro	168
	8.7.5 Slutsatser	168
8.8	Mekanisk utveckling	169
	8.8.1 Överblick	169
	8.8.2 Mekanisk utveckling för kapseln	170
	8.8.3 Mekanisk utveckling i geosfären	175
	8.8.4 Tilltro, kapselanalyser	181
	8.8.5 Tilltro, geosfärsanalyser	181
	8.8.6 Slutsatser	182
8.9	Kemisk utveckling	182
	8.9.1 Överblick	182
	8.9.2 Utveckling av grundvattnets sammansättning på sikt	184
	8.9.3 Kemisk utveckling hos buffert/återfyllning	194
	8.9.4 Korrosion av kopparkapseln	205
	8.9.5 Tilltro; grundvattensammansättningens utveckling	208
	8.9.6 Tilltro; buffertens kemiska utveckling	209
	8.9.7 Tilltro; kapselkorrosion	209
	8.9.8 Slutsatser	209
8.10	Sammanfattning	210
	8.10.1 Basscenario i ett tidsperspektiv	210
	8.10.2 Övergripande slutsatser	212
	8.10.3 Kommande arbete	212
8.11	Referenser	213

Del II

9	Kapseldefektscenario	217
9.1	Inledning	217
9.2	Initialtillstånd	217
	9.2.1 Initiala kapselskador	217
	9.2.2 Data till beräkningar av radionuklidtransport	218
9.3	Randförhållanden	219
9.4	Överblick av processer och beroenden	219
	9.4.1 Struktur för redovisningen	221
	9.4.2 Data till beräkningar av radionuklidtransport	222
9.5	Strårelaterad utveckling, kriticitet	223
	9.5.1 Inledning	223
	9.5.2 Förutsättningar	223
	9.5.3 Beräkningar	223
	9.5.4 Långtidsperspektiv	224
	9.5.5 Slutsatser	225
9.6	Hydromekanisk utveckling i defekt kapsel	226
	9.6.1 Korrosionsdata	226
	9.6.2 Hydraulisk utveckling i kapseln	227
	9.6.3 Vatteninträning via diffusion; lokal korrosion	229
	9.6.4 Mekaniska effekter av korrosionsprodukter	229
	9.6.5 Gastransport genom buffert	232
	9.6.6 Sekvens av händelser	234
	9.6.7 Data till beräkningar av radionuklidtransport	236
9.7	Kemisk utveckling i defekt kapsel	237
	9.7.1 Överblick	237
	9.7.2 Korrosion av gjutjärnsinsatsen	237
	9.7.3 Korrosion av metalldelar och kapslingsrör	238
	9.7.4 Upplösning av bränslematrisen	239
	9.7.5 Upplösning av gapinventarium	243
	9.7.6 Kemisk speciering av radionuklider	243
	9.7.7 Data till beräkningar av radionuklidtransport	248
9.8	Hydraulisk utveckling i geosfären	249
	9.8.1 Metod och modellverktyg	250
	9.8.2 Modellapplikation	252
	9.8.3 Aberg basfall och varianter	255
	9.8.4 Konceptuell osäkerhet vid Aberg	258
	9.8.5 Beberg basfall och varianter	261
	9.8.6 Ceberg basfall och varianter	264
	9.8.7 Jämförelse mellan platserna	267
	9.8.8 Osäkerheter	267
9.9	Transportprocesser i förvaret	270
	9.9.1 Överblick	270
	9.9.2 Transportprocesser i kapselns hålrum	270
	9.9.3 Transportprocesser i buffert/återfyllning	271
	9.9.4 Massöverföring mellan buffert/återfyllning och geosfär	273
	9.9.5 Diffusion/matrisdiffusion i geosfären	275
	9.9.6 Sorption i geosfären	276
	9.9.7 Advektion/dispersion och massöverföring mellan sprickor och bergmatris	277
	9.9.8 Kolloidtransport i geosfären	279
	9.9.9 Radionuklidtransport i gasfas	280

9.10	Radionuklidomsättning i biosfären	280
9.10.1	Processer i de ytnära ekosystemen	281
9.10.2	Beräkning av ekosystemspecifika dosomvandlingsfaktorer (EDF)	282
9.10.3	Data till beräkningar av radionuklidtransport	285
9.10.4	Diskussion	286
9.11	Beräkningar av radionuklidtransport	288
9.11.1	Inledning	288
9.11.2	Beskrivning av transportmodellerna	288
9.11.3	Tilltro till modellerna för grundvattenströmning och transport	291
9.11.4	Referens till data som används för att analysera radionuklidtransporten	296
9.11.5	Val av beräkningsfall	298
9.11.6	Vad händer i transportmodellerna?	299
9.11.7	Rimliga fall för Aberg, Beberg och Ceberg	300
9.11.8	Osäkerhetsanalys	305
9.11.9	Riskenalys	313
9.11.10	Specialfall	318
9.11.11	Analytiska beräkningar	322
9.11.12	Gasfastransport	327
9.11.13	Resultatdiskussion	327
9.12	Referenser	330
10	Klimatscenario	339
10.1	Inledning	339
10.2	Initialtillstånd	339
10.3	Randförhållanden	340
10.3.1	Jordens klimatsystem	340
10.3.2	Klimatförändringar	341
10.3.3	En möjlig klimatutveckling de kommande 150 000 åren	344
10.3.4	Tempererat/borealt tillstånd	348
10.3.5	Permafrosttillstånd	351
10.3.6	Glacialt tillstånd	354
10.3.7	Utvecklingen vid de tre förvarsplatserna	358
10.4	Osäkerheter i beskrivningen av randförhållanden	361
10.5	Överblick av processer och beroenden	362
10.6	Strålrelaterad utveckling	363
10.7	Termisk utveckling	364
10.7.1	Tempererat/borealt tillstånd	364
10.7.2	Permafrosttillstånd	364
10.7.3	Glacialt tillstånd	364
10.7.4	Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna	365
10.7.5	Utvecklingen i närzonen	365
10.7.6	Slutsatser	365
10.8	Hydraulisk utveckling	366
10.8.1	Tempererat/borealt tillstånd	366
10.8.2	Permafrosttillstånd	367
10.8.3	Glacialt tillstånd	368
10.8.4	Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna	369
10.8.5	Utvecklingen i närzonen	371
10.8.6	Slutsatser	372

10.9	Mekanisk utveckling	373
10.9.1	Tempererat/borealt tillstånd	373
10.9.2	Permafrosttillstånd	373
10.9.3	Glacialt tillstånd	373
10.9.4	Utvecklingen i geosfären vid de tre försvarsplatserna	375
10.9.5	Utvecklingen i närzonen	376
10.9.6	Slutsatser	377
10.10	Kemisk utveckling	377
10.10.1	Tempererat/borealt tillstånd	377
10.10.2	Permafrosttillstånd	378
10.10.3	Glacialt tillstånd	378
10.10.4	Utvecklingen i geosfären vid de tre försvarsplatserna	382
10.10.5	Utvecklingen i närzonen	385
10.10.6	Slutsatser	386
10.11	Radionuklidtransport	386
10.11.1	Tempererat/borealt tillstånd	387
10.11.2	Permafrosttillstånd	387
10.11.3	Glacialt tillstånd	388
10.11.4	Utvecklingen vid de tre försvarsplatserna	388
10.11.5	Slutsatser	392
10.12	Sammanfattning	392
10.12.1	Kommande arbete	394
10.13	Referenser	394
11	Tektonik – jordskalvsscenario	399
11.1	Inledning	399
11.2	Initialtillstånd	399
11.3	Randförhållanden	400
11.3.1	Inledning	400
11.3.2	Baltiska sköldens mekaniska uppbyggnad	402
11.3.3	Sköldens mekaniska tillstånd och utveckling	402
11.3.4	Jordskalv	404
11.4	Överblick av processer och beroenden	406
11.4.1	Mekanisk utveckling för kapseln	406
11.5	Mekanisk utveckling i geosfären	407
11.5.1	Analys av jordskalvsrisker	407
11.5.2	Osäkerheter	413
11.6	Slutsatser för säkerhetsanalysen	417
11.7	Referenser	417
12	Scenarier baserade på mänskliga handlingar	419
12.1	Inledning	419
12.2	Metod	420
12.3	Teknisk analys	421
12.4	Analys av samhällsfaktorer	422
12.5	Val av representativa scenarier	428
12.6	Analys av scenariot – borrning av djupa borrhål	430
12.6.1	Borrningens genomförande och syfte	430
12.6.2	Sannolikhet att scenariot inträffar	431
12.6.3	Radiologiska konsekvenser och risk	432
12.7	Sammanfattning	436
12.8	Referenser	438

13	Diskussion och slutsatser	439
13.1	KBS-3-metodens säkerhet i svensk berggrund	439
13.1.1	Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade?	440
13.1.2	Vilket är resultatet av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas?	440
13.1.3	Sammanvägning av scenarioanalyserna	444
13.1.4	Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar?	445
13.2	Metodik för säkerhetsanalys	448
13.2.1	Systembeskrivning	448
13.2.2	Val av scenarier	449
13.2.3	Analys av valda scenarier	449
13.2.4	Hantering av osäkerheter	449
13.2.5	Bedömning av tillgänglig metodik	450
13.3	Underlag för platsval och platsundersökningar	451
13.3.1	Vilka krav ställer djupförvaret på berget?	451
13.3.2	Program för platsundersökningar	452
13.4	Underlag för funktionskrav	452
13.5	Prioritering av forskning	454
13.6	Slutord	455
Bilaga 1	Referensbränslet	457
Bilaga 2	Data till beräkning av radionuklidtransporter	459

9 Kapseldefektscenario

9.1 Inledning

Förutsättningarna för kapseldefektscenario är desamma som för basscenariot så när som på en viktig punkt: Ett fåtal kapslar tänks vara behäftade med initiala fel så att isoleringen redan vid förvarets förslutning kan tänkas vara äventyrad.

I övrigt gäller som för basscenariot i korthet att förvaret tänks vara konstruerat enligt specifikationer och att dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå. Utvecklingen i och kring den majoritet av kapslar som antas vara oskadade förväntas därmed vara densamma som för basscenariot och dessa behandlas därför inte i kapseldefektscenario.

I stället behandlas alla relevanta aspekter av skadade kapslars utveckling i detalj liksom radionuklidspredning från skadade kapslar i buffert/återfyllning, geosfär och biosfär. För radionuklidspredningen krävs en betydligt mer detaljerad beskrivning av grundvattenströmning och biosfärförhållanden än vad som var fallet i basscenariot.

I avsnitt 9.4 ges en överblick av de processer och beroenden som analyseras i detalj i kapseldefektscenario. Där visas också hur redovisningen av detta kapitel genomförs, baserat på systemet av processer och beroenden. Mycket av delanalyserna banar väg för den avslutande analysen av radionuklidtransport.

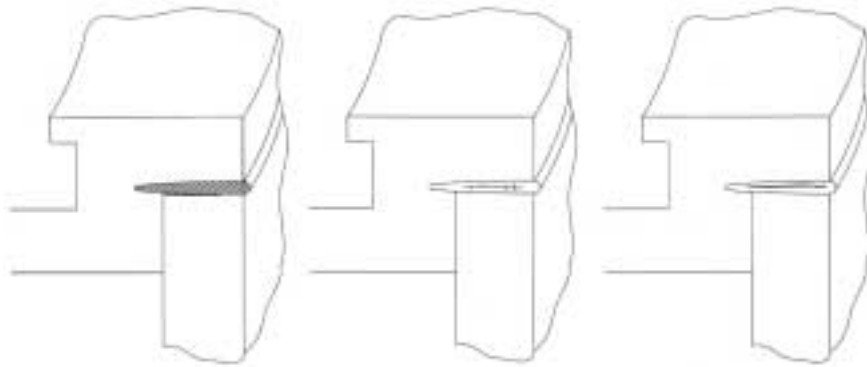
9.2 Initialtillstånd

Förvarets initiala tillstånd antas alltså vara detsamma som i basscenariot förutom att ett fåtal kapslar antas vara behäftade med upptäckta defekter så att isoleringen redan vid förvarets förslutning kan tänkas vara äventyrad.

9.2.1 Initiala kapselskador

En uppskattning av storlek och frekvens av initiala defekter måste bygga på antaganden och resonemang. Statistiskt relevanta data om defekter och frekvenser kan inte byggas upp innan det finns erfarenhet från ett stort antal kapslar som förslutits och sedan kontrollerats. Även ett sådant underlag skulle vara av begränsat värde eftersom de kapslar som upptäcks med defekter skulle kasseras eller åtgärdas och därför inte direkt kan användas för att uppskatta frekvens av defekta kapslar som undgår en kontroll.

Det grundläggande resonemanget för att bedöma storlek och omfattning av de initiala defekterna är dels att det bara finns få skeenden som skulle kunna leda till en initial defekt, dels att defekten inte bör kunna vara större än att det finns någon rimlighet i att den inte upptäcks. Om en skada ändå skulle förekomma är det därför troligast att den finns i svetsen mellan lock och mantel. De övriga svetsarna i kapselhöljet är lättare att inspektera eftersom detta kan göras både in- och utvändigt och dessutom i en icke radioaktiv miljö.



Figur 9-1. Illustration av initiala kapselskador orsakade av bindfel, sprickbildning respektive urladdningar i elektronkanonen /från Punshon, 1997/.

I Punshon /1997/ identifieras svetsdefekter som skulle kunna ge en genomgående skada:

- Bindfel innebär att svetsen inte har ”bundit” i både lock och mantel. Detta kan orsakas av t ex termisk expansion av materialet eller felaktig vinkel i svetskanonen.
- Sprickbildning i själva svetsfogen kan uppkomma vid reparationer av en misslyckad fog.
- Urladdningar i elektronstrålesvetsen kan ge metallånga som tillfälligt bryter elektronstrålen och orsakar hål i svetsen.

Alla dessa fel kan upptäckas med ultraljud. Teknik för att minimera risken för defekterna och metoder för att kontrollera att förslutningssvetsarna uppfyller ställda krav utvecklas i SKB:s Kapsellaboratorium. Figur 9-1 illustrerar de olika defekterna.

Om en defekt ska förbli oupptäckt måste den vara liten och bedöms inte kunna vara större än 1 mm².

Det finns idag ingen egentlig möjlighet att uppskatta antalet kapslar med initiala defekter. Konstruktionskraven för kapseln säger att högst en kapsel av tusen får lämna inkapslingsanläggningen med en svets som inte klarar acceptanskriterierna för den oförstörande provningen /Werme, 1998/. I SR 97 postuleras därför att som mest 0,1 procent av alla kapslar har initiala defekter. Det verkliga antalet kapslar med initiala defekter förväntas bli lägre.

9.2.2 Data till beräkningar av radionuklidtransport

I kapseldefektscenariot ansätts som ett rimligt fall att en kapsel av totalt cirka 4 000 har gått igenom kvalitetskontrollen med en genomgående defekt av storleken 1 mm². I de följande avsnitten diskuteras både cirkulära hål (sprickor och urladdningar) och kringgående defekter (bindfel).

I det pessimistiska fallet antas fem kapslar (dvs cirka 0,1 procent) ha sådana defekter.

9.3 Randförhållanden

De yttre förhållandena i kapseldefektscenariot postuleras vara desamma som i basscenariot, dvs i korthet:

- Dagens klimatförhållanden antas råda framgent.
- Landhöjning och den inverkan detta har på grundvattenflöden, biosfär etc inkluderas.
- Dagens platsspecifika biosfärer antas bestå förutom de effekter landhöjningen har på biosfären.
- Bergmekaniska förändringar sker endast till följd av aseismiska processer, dvs jordskalv inkluderas inte.
- Inga mänskliga intrång förekommer.

Randförhållandena beskrivs mer detaljerat i basscenariot, avsnitt 8.3.

9.4 Överblick av processer och beroenden

Alla processer och beroenden som förekommer i basscenariot, kapitel 8, förekommer även i kapseldefektscenariot. För kapslar med genomgående skador tillkommer dessutom en rad processer, de flesta inuti den skadade kapseln. I figur 9-2 visas gemensamma processer med basscenariot i svart och tillkommande processer i kapseldefektscenariot i rött.

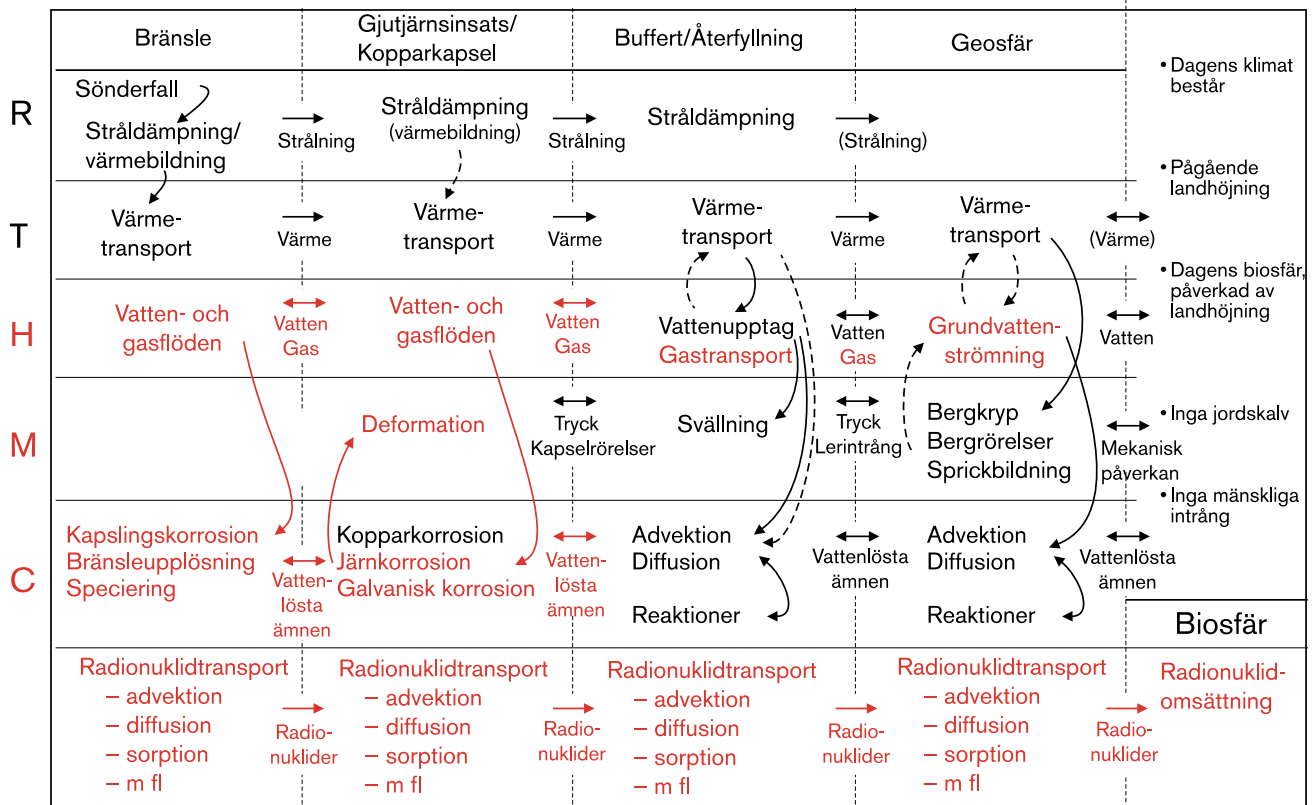
Utvecklingen startar med att vatten, antingen som vätska eller vattenånga, från bufferten tränger in i en skadad kapsel. Detta ger en omsättning av vatten och gas i kapselns inre, med starka kopplingar till några viktiga kemiska processer. Inträngande vatten i kontakt med insatsen leder till järnkorrosion. I den processen bildas vätgas som påverkar både de kemiska och hydrauliska förhållandena i kapselns inre, bl a genom att motverka vidare inflöde av vatten. Om gastrycket blir tillräckligt högt kan gas släppas ut som en puls genom bufferten och vidare ut i geosfären. Med tiden kan korrosionen också få mekaniska konsekvenser. Dels kan uppbyggnaden av fasta korrosionsprodukter i gapet mellan insats och kopparkapsel ge mekaniska påfrestningar som kan skada kopparhöljet ytterligare. Dels kan en omfattande järnkorrosion försämra den mekaniska hållfastheten hos gjutjärnsinsatsen. Vatten i en skadad kapsel kan också tänkas få konsekvenser för den strålrelaterade utvecklingen: Neutroner från bränslet kan genom dämpning (moderering) i vattnet bromsas till energier som gynnar neutroninducerad fission av framför allt U-235 och Pu-239 i bränslet. Vid fissionen frigörs nya neutroner och processen skulle under mycket ogynnsamma förhållanden kunna tänkas bli självunderhållande. Systemet sägs då vara kritiskt.

Om vattnet tränger ända in till bränslet sker även korrosion av kapslingsrör och andra metalldelar i bränslet. Metalldelarna innehåller radionuklider som frisätts genom korrosionen.

Om kapslingsrören har genomgående skador, antingen initialt eller orsakade av korrosionen kan vatten tränga in till bränslematrisen. Detta leder dels till att radionuklider på bränslematrisens yta kan lösas i vatten och bli tillgängliga för transport, dels till att bränslematrisen långsamt upplöses vilket i sin tur ger frisättning av matrisbundna

Förvarssystemet

Omgivning



Figur 9-2. Huvuddragen i processsystemet för kapseldefektscenariot. Röda processer har ett annat förlopp eller annan omfattning jämfört med basscenariot.

radionuklider. Nuklidernas kemiska form i kontakt med vatten i kapselns inre bestäms av specieringsprocesser som bl a avgör huruvida nukliderna förblir vattenlösta eller faller ut som fasta faser. Specieringen avgörs av den kemiska miljön i kapseln som i sin tur påverkas starkt av järnet och järnkorrosionen.

Vattenlösta radionuklider kan transporteras i kapselns inre, huvudsakligen genom diffusion och därigenom via skadan i kopparkapseln nå bufferten. Även där sker radionuklidtransport huvudsakligen med diffusion. Transporten genom bufferten påverkas även starkt av sorption. I geosfären kan radionuklider transporteras vidare med det strömmande grundvattnet; advektion. Här förekommer även matrisdiffusion dvs radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och undandras det flödande vattnet. Av avgörande betydelse för radionuklidtransporten är även sorption, dvs det faktum att radionuklider kan fastna på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Det radioaktiva sönderfallet slutligen påverkar innehållet av radionuklider i hela systemet och måste därför inkluderas i beskrivningen av transportfenomenen.

9.4.1 Struktur för redovisningen

Strukturen för redovisningen av kapseldefekts scenariot liknar den för basscenarioet, som följer en relativt strikt indelning i strålrelaterad, termisk, hydraulisk, mekanisk och kemisk utveckling. I kapseldefekts scenariot har indelningen modifierats något. Dessutom tillkommer ett omfattande avsnitt om radionuklidtransport, som bygger på materialet i de tidigare avsnitten. Huvudrubrikerna i kapseldefekts scenariot är följande:

Strålrelaterad utveckling, kriticitet

Utöver det som redovisas i basscenarioet behöver kriticitetsfrågan belysas i kapseldefekts scenariot. Detta görs i avsnitt 9.5.

Termisk utveckling

Den termiska utvecklingen för buffert och berg förväntas bli densamma som i basscenarioet i omgivningen till såväl intakta som skadade kapslar.

I en defekt kapsel skulle värmeledningsförmåga och därmed temperaturutveckling kunna påverkas av inträngande vatten. Vätskeformigt vatten i signifikanta mängder förväntas dock inte förekomma i en defekt kapsel förrän efter tusentals år enligt avsnitt 9.6. Resteffekten har då avtagit till så låga nivåer att temperaturförhöjningen i kapseln är mycket liten. Därmed kommer också en mindre förändring i värmeledningsförmåga i kapseln att sakna betydelse.

Ingen redovisning av den termiska utvecklingen genomförs därför i kapseldefekts scenariot.

Hydromekanisk utveckling i defekt kapsel och buffert

I avsnitt 9.6 behandlas vatteninträngning i en skadad kapsel med påföljande järnkorrosion och vätgasbildning. I avsnittet diskuteras också hur det ökande vätgasstrycket motverkar inflödet av vatten och hur vätgas vid tillräckligt höga tryck kan tränga igenom bufferten. Även den mekaniska utvecklingen i kapseln behandlas: Vid järnkorrosion bildas magnetit som har lägre densitet än järn och därmed tar upp en större volym. En omfattande uppbyggnad av korrosionsprodukter i kapseln leder till mekaniska påfrestningar.

Kemisk utveckling i defekt kapsel

I avsnitt 9.7 behandlas olika aspekter av den kemiska utvecklingen i en defekt kapsel bl a:

- Järnkorrosion.
- Korrosion av kapslingsrören kring bränslekutsarna och andra metalldelar i bränsleelementen.
- Upplösning/omvandling av bränslematrisen, en process som avgör takten för frisättning av många radionuklider.
- Kemisk speciering av radionuklider. Radionuklidernas kemiska form har avgörande betydelse för deras vattenlöslighet vilket i sin tur är avgörande för utsläppen av radionuklider från kapseln.

Hydraulisk utveckling i geosfären

I avsnitt 9.8 behandlas den hydrauliska utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna betydligt mer detaljerat än i basscenariot. Detta är nödvändigt för att ge en beskrivning av radionuklidtransport i geosfären.

Transportprocesser i förvaret

I avsnitt 9.9 behandlas transportprocesser för radionuklider i kapsel, buffert/återfyllning och geosfär.

Radionuklidomsättning i biosfären

Avsnitt 9.10 behandlar de biosfärsprocesser som har betydelse för radionuklidspridningen i olika ekosystem i biosfären.

Radionuklidtransport

I avsnitt 9.11 redovisas integrerade beräkningar av radionuklidtransport i kapsel, buffert/återfyllning, geosfär och biosfär. Kedjan av modeller som används för beräkning av radionuklidtransport presenteras. Mycket av förutsättningarna för beräkningarna kommer från tidigare avsnitt i redovisningen av kapseldefektscenariot. Avsnittet mynnar ut i redovisningen av en rad beräkningsfall och en diskussion av beräkningsresultaten.

9.4.2 Data till beräkningar av radionuklidtransport

Analysen av kapseldefektscenariot innehåller beräkningar av radionuklidtransport i kapsel, buffert/återfyllning, geosfär och biosfär. En stor mängd data som används i dessa beräkningar fås som ett resultat av de inledande analyser som föregår analysen av radionuklidtransport. Dessa data redovisas direkt i respektive avsnitt enligt följande:

- Kapselskador, avsnitt 9.2.2.
- ”Karenstid”, avsnitt 9.6.2.
- Bränsleupplösningshastighet, avsnitt 9.7.4.
- Radionuklidens lösligheter, avsnitt 9.7.6.
- Grundvattenflöden och advektiva gångtider, avsnitt 9.11.2.
- Transportdata i buffert och geosfär, avsnitt 9.9.
- Biosfärsomvandlingsfaktorer, avsnitt 9.10.3.

Data till transportberäkningar redovisas genomgående under rubriken ”Data till beräkningar av radionuklidtransport” i respektive avsnitt. Som framgått av kapitel 4 är en genomgående strävan i valet av data att finna dels en uppsättning rimliga värden, dels en uppsättning som säkert ger ett pessimistiskt resultat i beräkningarna. I Datarapporten finns en mer utförlig motivering till valet av data.

9.5 Strårelaterad utveckling, kriticitet

9.5.1 Inledning

Den strårelaterade utvecklingen antas i allt väsentligt vara densamma för en skadad och en oskadad kapsel, dvs strålnivåer i och kring kapseln påverkas mycket marginellt av en skada i kopparhöljet med åtföljande vatteninträning.

En viktig fråga kring den strårelaterade utvecklingen måste dock utredas i detalj: Kan förhållandena i en skadad kapsel under några omständigheter tänkas bli sådana att en fissionsprocess blir självunderhållande? Här är det viktigt att studera olika bränsletyper, utbränningsgrader och hydrauliska förhållanden inne i kapseln.

Neutroner med lämplig energi kan orsaka kärnklyvningar i framför allt uran-235, plutonium-239 och plutonium-241 i det använda bränslet. Om vatten tränger in i en defekt kapsel kan neutroner modereras (bromsas) till lämpliga energier. Under mycket ogynnsamma omständigheter skulle detta kunna resultera i en självunderhållande kedjereaktion. Systemet sägs då vara kritiskt.

Avgörande för kriticitetsförhållandena i ett system är den k_{eff} effektiva neutronmultiplikationskonstanten, k_{eff} . Vid varje fission bildas i genomsnitt 2,5–3 nya neutroner. Dessa kan infångas av andra atomkärnor i bränslet, i kapselmaterialet eller i omgivningen. k_{eff} anger hur många av de nya neutronerna som ger upphov till en ny fission. Om k_{eff} har precis värdet **ett** uppnår man ett k_{eff} kritiskt tillstånd och man får en självunderhållande kedjereaktion. Om k_{eff} är mindre än ett måste man tillföra neutroner på annat sätt för att hålla igång reaktionen. Om k_{eff} är större än ett får man ett ständigt ökande antal fissioner.

Agrenius /1999/ beräknar kriticitetsförhållandena i kapseln för olika förhållanden. Nedanstående material är hämtat från den rapporten.

9.5.2 Förutsättningar

Kriticitetsförhållandena har beräknats med den kapselutformning som beskrivs i avsnitt 6.3. Beräkningarna har gjorts för BWR-bränsle av typ SVEA-64 med en medelanrikning av 3,6 procent U-235 och för PWR-bränsle av typ F17x17 med en medelanrikning av 4,2 procent U-235.

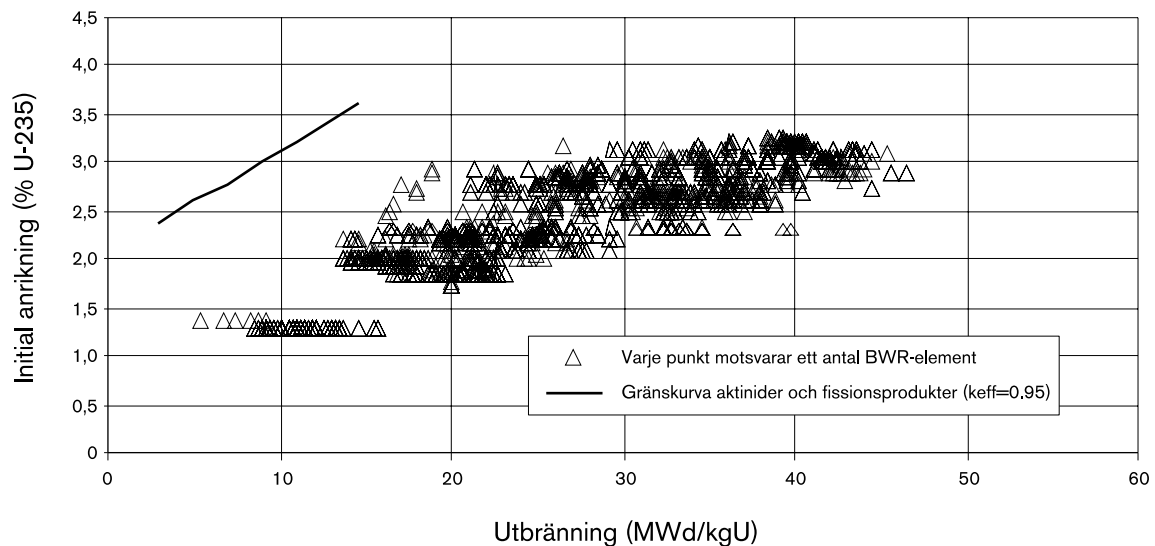
Dessa bränslen ger ur kriticitetssynpunkt en täckning av de bränsletyper som förväntas förekomma i ett verkligt förvar. Referensbränslet i SR 97 (BWR, SVEA 96) har en mindre benägenhet till kriticitet.

Kravet ur kriticitetssynpunkt är att k_{eff} inte får överskrida 0,95 sedan hänsyn tagits till osäkerheter vid bestämningen av värdet.

Beräkningarna görs för en situation där bränslet tänks placerat i kapslar där insatsens hålrum fyllts med vatten och där kapslarna utvändigt är omgivna av bentonit.

9.5.3 Beräkningar

Oanvänt bränsle har en reaktivitet (benägenhet att bli kritiskt) som beror av anrikningen. Vid driften förbrukas klyvbart material i bränslet och därför avtar reaktiviteten med utbränningsgraden.



Figur 9-3. Gränskurva och bränsledata för BWR-bränsle.

Med kunskap om hur k_{eff} -värdet beror av anrikning och utbränning kan man räkna ut vilka kombinationer av dessa faktorer som ger k_{eff} -värdet 0,95 i kapselgeometri.

Figur 9-3 visar en kurva med kombinationer av anrikning och utbränning som ger k_{eff} -värdet 0,95 för BWR-bränsle. Fissionsprodukter som absorberar neutroner och därmed sänker reaktiviteten är inkluderade i beräkningen.

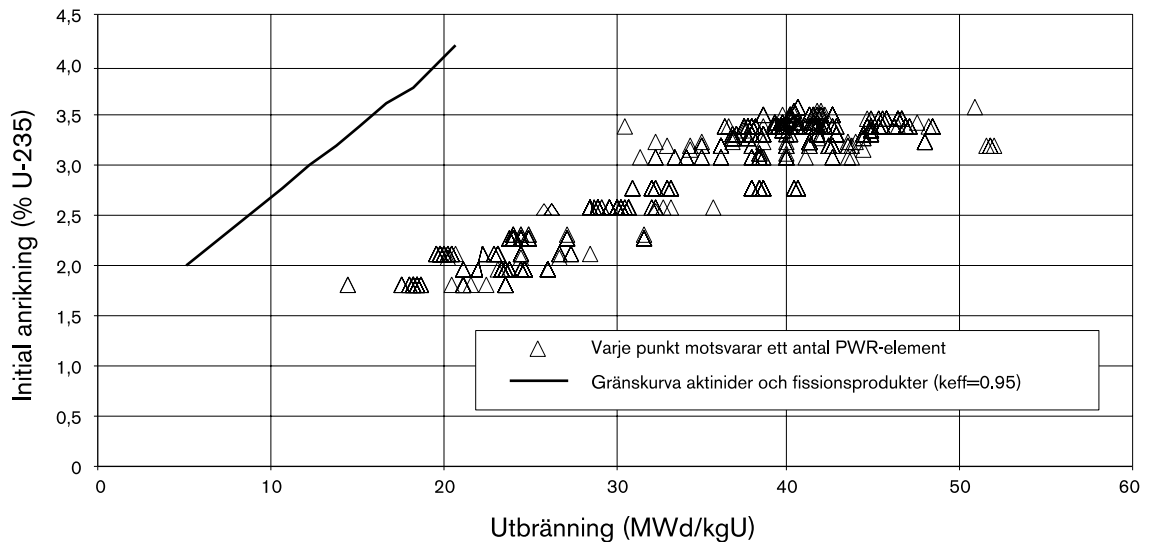
Inför beräkningarna analyserades osäkerheter i bestämningen av utbränningsgraden. Också effekter av ojämn utbränning inom bränsleelementet, av urplockade bränslestavar, varierande avstånd mellan kanaler, spaltbredd mellan element och kanal, excentrisk placering samt håligheter och porositeter i insatsen analyserades. Beräkningarna är gjorda med marginal för osäkerheter i samtliga dessa faktorer.

I figur 9-3 är också egenskaperna för allt BWR-bränsle i CLAB den 31 december 1998 inritat. Alla bränsleelement ligger under gränskurvan i diagrammet och kan därmed ur kriticitetssynpunkt accepteras för placering i kapseln. Motsvarande gränskurva och CLAB-inventarium för PWR-bränsle visas i figur 9-4. Av diagrammen framgår att allt bränsle som för närvarande lagras i CLAB med god marginal klarar kriticitetskraven.

9.5.4 Långtidsperspektiv

Djupförvaret ska fungera under mycket lång tid och därför är det nödvändigt att analysera hur förvarets långsiktiga utveckling skulle kunna påverka kriticitetsrisken. Processer som har potentiell betydelse är:

- Reaktivitetsförändringar på grund av radioaktivt sönderfall.
- Korrosion och andra kemiska processer som påverkar kapsel, kapselinsats, bränslematerial och bränslegeometri.
- Lokal ansamling av fissilt material.



Figur 9-4. Gränskurva och bränsledata för PWR-bränsle.

Radioaktivt sönderfall

I ett tidigt skede sjunker reaktiviteten på grund av sönderfall av Pu-241. I ett mycket långt tidsperspektiv stiger reaktiviteten åter genom sönderfall av aktinider, vilket gör att neutronabsorptionen minskar. Reactiviteten i djupförvaret är dock aldrig större än för bränslesammansättningen 40 dagar efter drift, som används vid beräkningarna.

Korrosion

Korrosion av kapselinsatsen skulle kunna minska bränslekanalernas dimensioner på grund av uppbyggnad av korrosionsprodukter. Beräkningarna av detta fall visar att reaktiviteten minskar kraftigt om kanalerna fylls med korrosionsprodukter och bränslet är intakt. Järnets absorberande verkan gör att k_{eff} sjunker till cirka 0,5.

Om samma beräkning görs med den geometri som ger den högsta reaktiviteten, blir resulterande k_{eff} 0,7 för BWR- och 0,65 för PWR-fallet.

Slutsatsen är att korrosion av kapselinsatsen missgynnar uppkomsten av kriticitet.

Lokal ansamling av fissilt material

Hicks och Green /1999/ har sammanfattat studier om kriticitet i förvar för radioaktivt avfall. Slutsatsen är att sannolikheten för en lokal ansamling av en kritisk massa är liten och att även om en sådan skulle bildas är konsekvenserna små.

9.5.5 Slutsatser

Analyserna visar att det använda BWR- och PWR-bränsle som finns i CLAB och det som kommer från de svenska kärnkraftverken kan förvaras i kapslarna med god marginal till kriticitet även om kapslarna av någon anledning helt eller delvis skulle fyllas med vatten. Framtida förändringar av isotopsammansättning, material eller geometri förutses inte ge minskad marginal till kriticitet.

9.6 Hydromekanisk utveckling i defekt kapsel

Den hydrauliska utvecklingen i en kapsel med skadat kopparhölje ligger till grund för alla väsentliga processer som skiljer utvecklingen hos en skadad kapsel från den hos en oskadad: Inträngning av vatten är en förutsättning för korrosion av gjutjärnsinsatsen som i sin tur ger produktion av vätgas. Vatten är också en förutsättning för korrosion av bränslets metalldelar, bränsleupplösning och radionuklidtransport.

Genom att korrosionsprocesserna dels förbrukar vatten, dels producerar vätgas finns starka kopplingar mellan den kemiska och den hydrauliska utvecklingen och dessa måste därför delvis beskrivas i ett sammanhang. Även vissa aspekter av den mekaniska utvecklingen måste behandlas parallellt med de hydrokemiska processerna.

I detta avsnitt behandlas vatteninträngning i kapseln, förbrukning av vatten och uppbyggnad av vätgastryck till följd av järnkorrosion och utsläpp av gas från kapselns inre genom buffert till geosfär. Dessutom beskrivs uppbyggnad av fasta korrosionsprodukter mellan gjutjärnsinsats och kopparhölje och de konsekvenser detta kan få i form av att den initiala skadan vidgas.

Processerna är betydelsefulla för funktionen hos ett förvar. För att radionuklider ska kunna transporteras ut från det använda bränslet krävs en kontinuerlig vattenväg mellan bränslet och grundvattnet i berget, med undantag av nuklider som transporteras med gas. Förbrukningen av vatten i kapseln gör att det kan ta mycket lång tid innan en sådan vattenväg bildas.

Till grund för beskrivningen ligger två nya modellstudier av den hydromekaniska utvecklingen i en kapsel med skadat kopparhölje, en av Bond m fl /1997/ och en av Takase m fl /1999/. I det följande redovisas först en rad delförlopp, vilket också är det som modellerats i studierna. Därefter skisseras en trolig sekvens av händelser, sammansatt av de olika delförloppen.

9.6.1 Korrosionsdata

Reaktionshastigheten för järnkorrosion är på flera sätt avgörande för den fortsatta utvecklingen om vatten tränger in i kapseln. Korrosionshastigheten bestämmer bildningstakten av vätgas och fasta korrosionsprodukter och får därmed stor betydelse för den hydrauliska respektive mekaniska utvecklingen i kapseln. Hastigheten styr också förbrukningen av vatten i kapseln. Detta påverkar indirekt radionuklidtransporten som förutsätter en kontinuerlig vattenväg mellan bränslet och hålet i kapseln.

För den kvantitativa behandlingen av den hydrauliska utvecklingen krävs data om korrosionshastigheten. Korrosionsprocessen diskuteras i detalj i avsnitt 9.7.2. Baserat på den redovisningen kan 0,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ användas som en rimlig utgångspunkt för diskussionerna nedan, både för vätskeformigt vatten och för vätgas mättad med vattenånga.

9.6.2 Hydraulisk utveckling i kapseln

Vid en genomgående skada i kapselns kopparhölje kan vatten drivas genom bufferten och in i kapseln av skillnaden mellan kapselns inre gastryck och grundvattentrycket. Då vatten kommer i kontakt med järninsatsen kommer denna att korrodera. Järnkorrosionen förbrukar det inträngande vattnet samtidigt som vätgas bildas och gastrycket i kapseln ökar. Därmed reduceras tryckdifferensen över bufferten och inflödes hastigheten av vatten minskar.

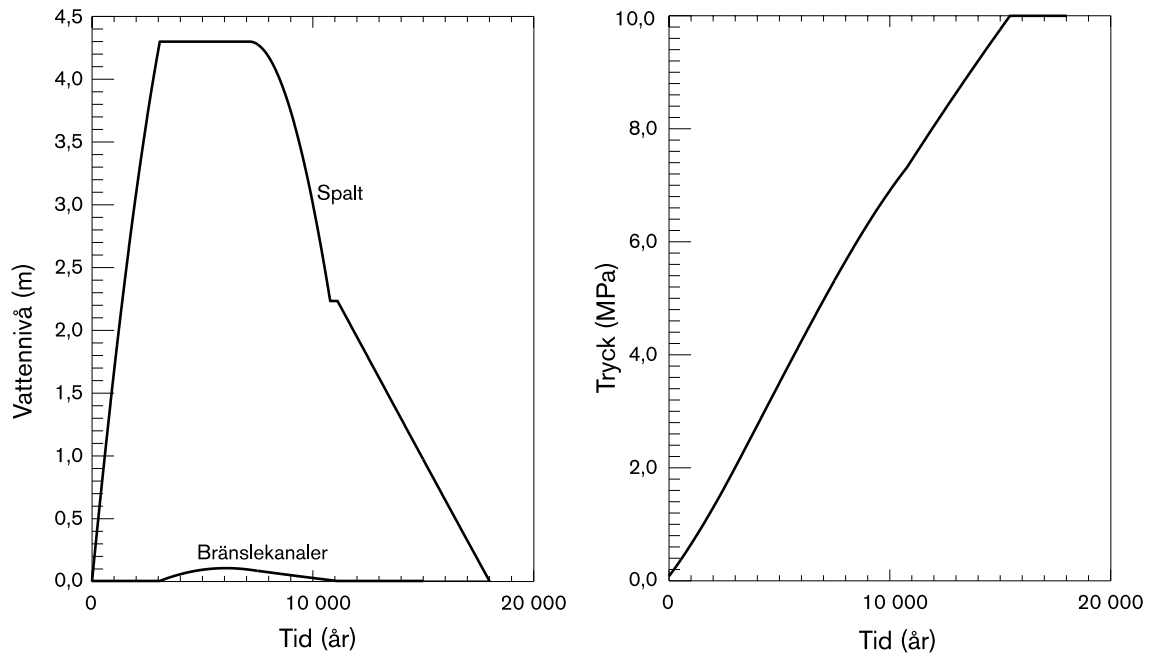
Flödet av vatten in i en skadad kapsel beror av skadans storlek och form, buffertens permeabilitet och tryckskillnaden mellan grundvattnet och kapseln innandöme. För ett cirkulärt hål med arean 1 mm^2 kan flödet beräknas till $5,5 \text{ ml/år}$ med typiska värden för egenskaperna hos buffert och grundvatten. För en spricka kring mantelperiferin, också med arean 1 mm^2 , blir inflödet $1,2 \text{ liter/år}$ /Bond m fl, 1997/. I det första fallet skulle kapselns hålrum (cirka 1 m^3) fyllas på $180\,000$ år och det andra fallet 850 år. Hålets form har således stor betydelse för inflödes hastigheten. Dessa beräkningar förutsätter att inget mottryck byggs upp i kapseln.

I realiteten förväntas vätgas från korrosion av järninsatsen att ge en tryckuppbyggnad i kapseln vilket i sin tur minskar inflödet. Inträngning av vatten i kapseln, kopplat med vattenförbrukning och tryckuppbyggnad har modellerats av både Bond m fl /1997/ och Takase m fl /1999/ för en mängd olika förhållanden. De flesta beräkningarna i dessa arbeten gäller 5 mm^2 skador. I vissa fall som redovisats nedan har resultaten skalats om till att gälla 1 mm^2 , eftersom detta värde ansatts på storleken för den initiala skadan som utreds i kapseldefektscenariot.

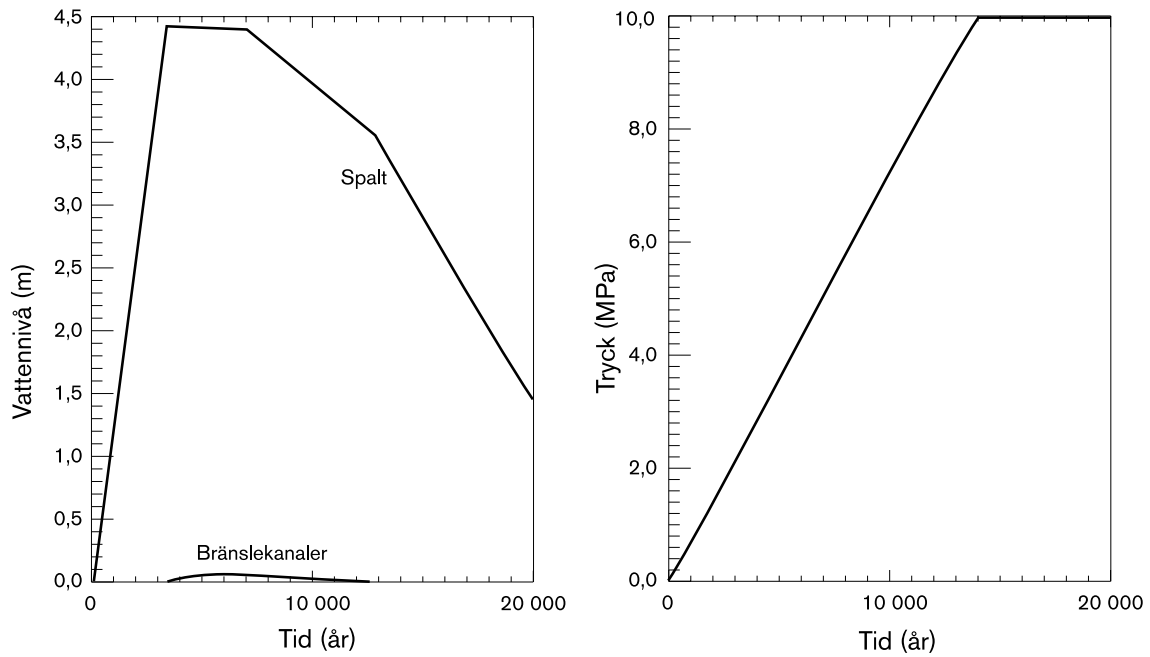
För en korrosionshastighet av $0,1 \text{ } \mu\text{m/år}$ och ett 1 mm^2 cirkulärt hål kommer enligt beräkningarna aldrig någon vattenvolym att byggas upp, eftersom allt inträngande vatten förbrukas av korrosion. Trycket i kapseln närmar sig med tiden asymptotiskt grundvattentrycket. Trycket i kapseln är 4 MPa efter cirka $4\,500$ år och $4,9 \text{ MPa}$ efter cirka $11\,000$ år.

Vid en större skada och/eller en lägre korrosionshastighet kan vatten hinna samlas i kapseln. För en korrosionshastighet av $0,01 \text{ } \mu\text{m/år}$ och ett 5 mm^2 cirkulärt hål fylls spalten mellan hölje och insats med vatten på cirka $3\,000$ år med antagandet att skadorna i både hölje och insats är belägna upptill. Därefter kan vatten rinna in i kanalerna i insatsen. Vattennivån i insatsens kanaler beräknas nå en decimeter efter cirka $6\,000$ år. Nivån förväntas sedan sjunka, eftersom det ökande vätgastrycket minskar inflödet av vatten och korrosionen förbrukar vattnet som redan trängt in.

Efter cirka $11\,000$ år beräknas kapseln åter vara fri från vätskeformigt vatten. I det här fallet når gastrycket i kapseln 5 MPa efter cirka $7\,000$ år och då avstannar inflödet. Den fortsatta korrosionen gör att trycket efter cirka $15\,500$ år stigit till 10 MPa . Då trycket når summan av grundvattentrycket (5 MPa) och buffertens svälltryck (antagen till 5 MPa i denna studie) kan gas lämna kapseln genom bufferten, se vidare avsnitt 9.6.5.) Vattennivån i gap och insats samt trycket i kapseln för detta fall visas i figur 9-5. Korrosionen antas ske globalt, både där det finns vätskeformigt vatten och ånga, i båda fallen med samma hastighet.



Figur 9-5. Hydrauliska förlopp i en kapsel med korroderande insats.



Figur 9-6. Beräkning av Takase m fl /1999/ av samma förlopp som i figur 9-5.

För att verifiera resultaten i Bond m fl /1997/ har Takase m fl /1999/ gjort en studie av det kopplade förloppet vatteninträning-korrosion-gasbildning med liknande kvalitativa slutsatser. Även de numeriska resultaten överensstämmer väl för de flesta beräkningsfallen. Figur 9-6 visar resultaten från Takase m fl /1999/ för samma modellering som illustreras i figur 9-5.

Slutsatsen från de båda studierna är att inträngande vatten i en kapsel kommer att förbrukas och torra förhållanden kommer att råda under långa tider. Processens förlopp är dock starkt beroende av värdet på framför allt korrosionshastigheten och storleken på skadan i höljet.

Om skadan i kopparhöljet i stället har formen av en perifer spricka, också med arean 1 mm^2 , blir utvecklingen radikalt annorlunda. Inflödet av vatten blir då cirka 200 gånger högre och något mottryck hinner inte byggas upp innan kapselns hålrum i det närmaste fyllts med vatten. Ett högt gastryck kan därefter snabbt byggas upp i det begränsade hålrum som inte vattenfylles.

9.6.3 Vatteninträning via diffusion; lokal korrosion

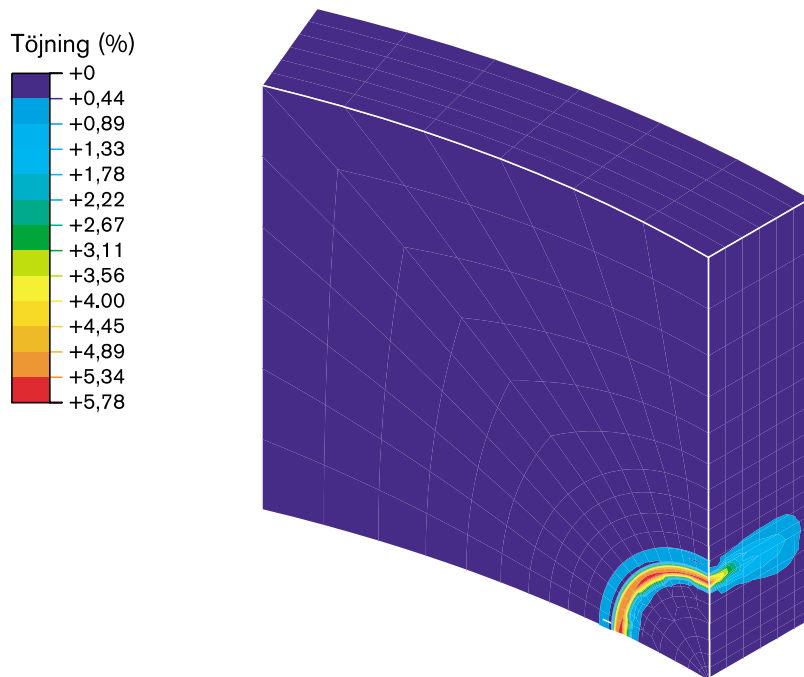
Då gastrycket i insatsen når grundvattentrycket kommer inflödet av vatten till kapseln att avstanna. Vatten kan därefter fortsätta att tränga in genom diffusion och på så sätt upprätthålla korrosionen. Diffusionen är mycket långsam; med ett 1 mm^2 cirkulärt hål och korrosionshastigheten $0,1 \text{ } \mu\text{m}/\text{år}$ blir inflödet cirka 10^{-5} liter/år. Det är sannolikt att den begränsade intransporten gör att korrosion bara kommer att ske närmast skadan i kapseln. I Bond m fl /1997/ beräknas storleken på den yta kring skadan som förväntas korrodera till följd av indiffusion av vatten. Modellstudien visar att det är troligt att korrosion kommer att ske över ett område med ungefär fem centimeters radie från defekten i kopparhöljet med en korrosionshastighet av cirka $0,1 \text{ } \mu\text{m}/\text{år}$ och ett cirkulärt hål av 1 mm^2 . Korrosionsytan blir i detta fall proportionell mot skadans yta.

Intransporten av vatten och korrosionen är också beroende på avståndet mellan kapsel och insats. I diffusionsberäkningen förutsätts en initial spalt på 1 mm , som minskar med tiden genom att den fylls med korrosionsprodukter, vilket medför att vattentransporten och korrosionsytan också minskar.

9.6.4 Mekaniska effekter av korrosionsprodukter

Då insatsen korroderar kommer ett lager av magnetit att byggas upp bl a mellan insats och hölje. Magnetit har lägre densitet än järn och korrosionsprodukterna kommer därför att utöva ett tryck mellan insats och hölje. I Bond m fl /1997/ analyseras effekterna av detta dels om korrosionen sker över hela insatsens ytteryta (global korrosion), dels vid korrosion lokalt kring skadan i kopparhöljet.

Lokal korrosion: Om korrosionen sker lokalt kring skadan i kopparhöljet, visar beräkningarna att höljet deformeras kraftigt kring defekten utan att själva defekten vidgas. Figur 9-7 visar töjningen i höljet för en $0,5 \text{ mm}$ utvidgning av kopparhöljet med en korrosionsradie av 4 cm . Detta svarar ungefär mot den troliga korrosionsradien vid 1 mm^2 cirkulärt hål och korrosionshastigheten $0,1 \text{ } \mu\text{m}/\text{år}$. Med de givna förutsättningarna och materialegenskaperna förväntas detta, i ett längre tidsperspektiv, leda till att en cirkulär skiva, lika stor som korrosionsytan, ”stansas” ut ur höljet.



Figur 9-7. *Plastisk töjning i kopparböljet för fallet med 4 cm korrosionsradie och 0,5 mm last /Bond m fl, 1997/. Kopparböljet töjs plastiskt i den yttre delen av korrosionsområdet.*

Höljet beräknas brista då det töjts cirka 20 mm. Densitetsförhållandet mellan magnetit och järn är 2,1:1 och med en korrosionshastighet av 0,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ kan brottiden beräknas till cirka 200 000 år.

Lokal korrosion gav i modellstudierna (cirkulärt hål) aldrig spänningar som påverkar integriteten hos insatsen.

Global korrosion: Om korrosionen sker över hela insatsens ytteryta töjs hela kopparhöljet av trycket från korrosionsprodukterna. Med korrosionshastigheten 0,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ ligger spänningarna efter cirka 23 000 år kring drygt 100 MPa allmänt i höljet och 2,5 gånger högre nära defekten (cirkulärt hål). Ingen signifikant utvidgning har då skett av defekten enligt beräkningarna.

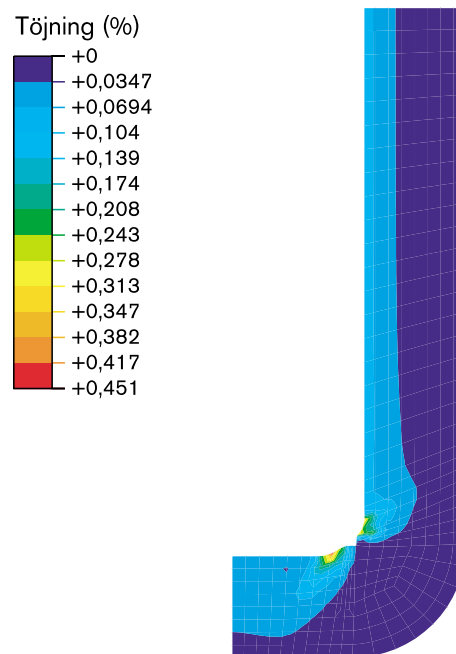
Samtidigt har tillräckliga spänningar byggts upp för att orsaka lokal plastisk deformation i kanten av insatsens lock, men spänningarna påverkar inte insatsens hållfasthet.

I ett längre tidsperspektiv med global korrosion medför uppbyggnaden av korrosionsprodukter att kopparhöljet töjs och då uppkommer de största töjningarna kring kapsellocket. Efter cirka 200 000 år av global korrosion beräknas locket lossna.

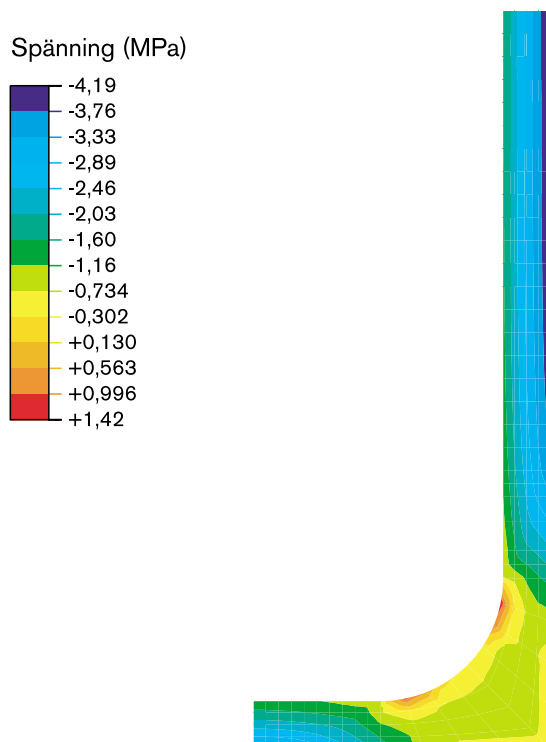
Efter cirka 500 000 år beräknas insatsen ha korroderat fullständigt. Man har då räknat med korrosion bara från insatsens ytteryta. Töjningen i kopparhöljets mantel är fortfarande mindre än 20 procent, vilket innebär att den inte förväntas spricka. Materialet tål cirka 40 procents töjning, se avsnitt 8.8.2. Den mycket långsamma töjningen gör att brott kan komma tidigare. Detta har dock ingen betydelse i analysen eftersom kapselns barriärfunktion försummas när den globala korrosionen startar efter 200 000 år.

I denna situation har insatsen förlorat sin mekaniska hållfasthet. Bränslekanalerna förväntas vara fyllda med korrosionsprodukter och detta gör att kapseln bedöms deformeras marginellt av yttre laster.

För att bestämma hur den globala korrosionen påverkar buffert och berg har de mekaniska spänningarna i kapsel, buffert och 10 cm av berget beräknats för situationen där insatsen korroderat fullständigt. Kopparhöljets radie beräknas då ha töjts 55 mm. Buffertens egenskaper gör att den kan ta upp merparten av spänningarna från kapseln utan att föra över dem till berget i denna situation. Bufferten har deformeras lokalt i botten, se figur 9-8.



Figur 9-8. Maximal plastisk töjning i bufferten för fallet med korrosion över belad insatsens yta.

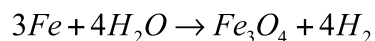


Figur 9-9. Maximala spänningar i berget för beräkningsfallet med korrosion över hela kapselytan.

De maximala tryckspänningarna i berget ligger kring 4 MPa och dragspänningarna kring 1,4 MPa. Tryckspänningarna bedöms inte påverka berget. Dragspänningarna skulle kunna orsaka lokala sprickor i nedre hörnet av deponeringshålet. Figur 9-9 visar spänningarna i berget.

9.6.5 Gastransport genom buffert

Korrosionen av insatsen producerar vätgas enligt:



Insatsen totala yta är cirka 34 m². En korrosionshastighet av 0,1 µm/år ger då en gasproduktion av 1,5·10⁻² m³/år (STP) vid global korrosion.

Vid lokal korrosion förväntas allt inträngande vatten förbrukas av korrosionen. Inflödet av vatten beräknas enligt avsnitt 9.6.3 till cirka 10⁻⁵ liter/år för en 1 mm² skada och korrosionshastigheten 0,1 µm/år. Detta svarar mot en vätgasproduktion av 1,2·10⁻⁵ m³/år (STP).

Bufferten är i vattenmättat tillstånd ogenomtränglig för strömmande gas och därför förväntas ett gastryck byggas upp i kapselns hålrum. Gasen kan lösas i vatten och diffundera genom bufferten ut till berget. Lösligheten och diffusiviteten är dock relativt

låga, vilket gör att transportkapaciteten blir begränsad. Wikramaratna m fl /1993/ beräknar den diffusiva transportkapaciteten till cirka $2 \cdot 10^{-6}$ m³/år för en 1 mm² defekt vid ett inre gastyck av 15 MPa. Detta är alltså inte tillräckligt för att transportera bort bildad gas vid vare sig global eller lokal korrosion.

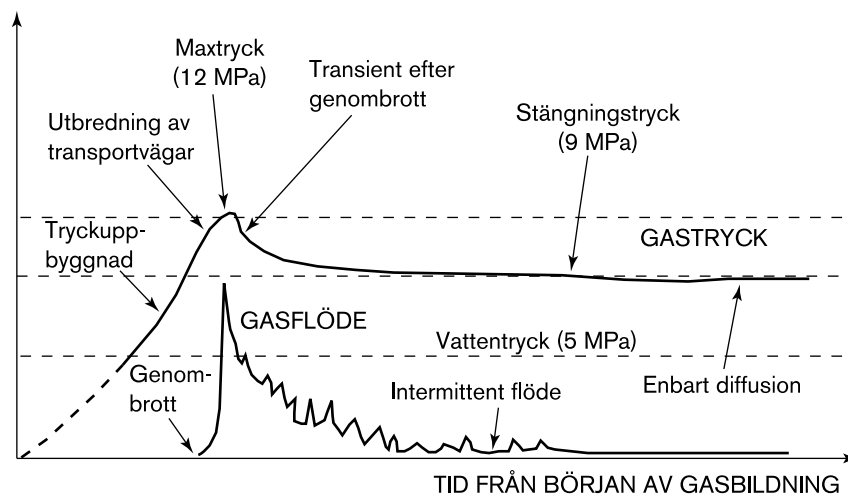
Flera experiment har visat att bentonit inte släpper igenom gas förrän trycket i kapseln överstiger summan av svälltrycket och grundvattentrycket, dvs cirka 12–14 MPa /Pusch m fl, 1985; Horseman m fl, 1997; Tanai m fl, 1997/. 14 MPa tryck i kapselns hålrum svarar mot gasvolymen 140 m³ vid STP.

Då trycket når detta värde bildas en transportväg genom bufferten och gas frigörs. De experimentella resultaten kan tolkas som att ett system av mikrosprickor bildas genom bristningar i lermaterialet. Trycket kommer att sjunka och gasproduktionen bestämmer den fortsatta utvecklingen.

- Om trycket sjunker till ett tillräckligt lågt värde stängs transportvägen. Detta så kallade stängningstryck är beroende av svälltrycket. Vid normalt svälltryck, 7–8 MPa är stängningstrycket 3–5 MPa enligt mycket preliminära uppskattningar. Därefter transporteras gas åter enbart med diffusion, se figur 9-10. Om gasproduktionen pågår tillräckligt länge kan man i detta fall få ett cykliskt förlopp med successiva gaspulsutsläpp och tryckuppbbyggnader.
- Om gasproduktionen däremot är tillräcklig för att upprätthålla ett högre tryck förväntas gastransportvägen förbli öppen.

Buffertens kapacitet för gastransport är föremål för undersökningar.

Huvuddelen av vattnet i bufferten är starkt bundet till lermineralet och mycket svårt att avlägsna med en strömmande gas /Rodwell m fl, 1999/. Svälltrycket innebär dessutom att en eventuell gastransportväg slutar då gastransporten upphör. En gastransportväg genom bufferten bedöms därför inte påverka dess övriga egenskaper.



Figur 9-10. Tidsförloppet vid gastransport genom bentonit. Tidsskalan i figuren är relativ och beror på bl a hastigheten för tryckuppbbyggnaden.

9.6.6 Sekvens av händelser

De tidigare avsnitten beskriver hydrauliska och mekaniska processer separat – här följer en kopplad beskrivning.

Processerna i en defekt kapsel är mycket långsamma och i princip omöjliga att verifiera experimentellt. Utvecklingen är också stark beroende av några av de ingående parametrarna, framför allt korrosionshastigheten och storleken på defekten i kopparhöljet.

I det följande redovisas två sekvenser av händelser, den ena för ett 1 mm² stort cirkulärt hål, den andra för en lika stor perifer spricka. Som utgångspunkt för båda fallen antas korrosionshastigheten vara 0,1 µm/år.

Den händelsesekvens som beskrivs här är baserad på resonemanget i Bond m fl /1997/ och i huvudfallet antas en korrosionshastighet av 0,1 µm/år och en defekt med arean 1 mm².

Cirkulärt hål

Tiden fram till cirka 11 000 år: Vatten förväntas strömma in i kapseln drivet av tryckskillnaden mellan grundvattnet i berget och gasen i kapselns hålrum. Korrosionshastigheten är tillräckligt hög för att förbruka allt vatten. Efter cirka 11 000 år beräknas trycket i kapseln nå 5 MPa och intransporten av vatten sker därefter genom diffusion av vattenånga.

11 000 till 18 000 år: Vatten diffunderar in kring skadan och korrosion förväntas endast lokalt cirka 5 cm kring defekten. Efter cirka 18 000 år beräknas korrosionsprodukterna ha fyllt den 2 mm vida spalten mellan insats och hölje och höljet kommer att börja töjas. Gasproduktionen är låg i det här tidsintervallet, eftersom intransporten av vatten är långsam.

18 000 till 200 000 år: Korrosionsprodukterna kring defekten förväntas töja ut kopparhöljet. Efter cirka 200 000 år beräknas kopparhöljet ge vika och ett hål lika stort som korrosionsytan uppkommer. I det här tidsintervallet är gasproduktionen fortfarande låg.

200 000 till 400 000 år: När ett större hål har bildats kommer vattentransporten in till kapseln åter att öka och det är troligt att hela insatsens yta kommer att korrodera. I det här skedet är det inte omöjligt att gasproduktionen antar det maximala värdet $1,5 \cdot 10^{-2}$ m³/år (STP). Tryckökningen blir då maximalt cirka 1 MPa på 700 år vilket gör att gasen sannolikt inte kan försvinna med diffusion och gasutsläpp kan förväntas i bufferten. Töjningarna blir nu störst kring kapsellocket och efter cirka 400 000 år beräknas locket lossna.

400 000 till 700 000 år: Den globala korrosionen fortsätter och efter cirka 700 000 år har insatsen korroderat igenom till bränslekanalerna. Töjningen i manteln på kopparhöljet är fortfarande mindre än 20 procent, vilket innebär att den inte förväntas spricka. Efter cirka 700 000 år bedöms gasproduktionen sjunka på grund av att nästan allt järn har förbrukats och gasutsläppen genom bufferten upphör. Bufferten har deformerats lokalt i botten. Berget är huvudsakligen utsatt för tryckspänningar, och bedöms inte skadas. De dragspänningar som förekommer kring deponeringshålet är mycket lokala.

Kringgående skada

Förloppet om skadan har formen av en kringgående defekt har inte modellerats i Bond m fl /1997/ eller Takase m fl /1999/. Den beskrivning som följer här är därför mera summarisk.

Tiden fram till cirka 800 år: Transportmotståndet är mycket mindre i en kringgående skada än i ett cirkulärt hål. Detta medför att spalten mellan kapsel och hölje fylls mycket snabbt och även bränslekanalerna förväntas fyllas med vatten. Om inget mottryck byggs upp skulle hela kapseln kunna fyllas på cirka 850 år. Korrosionen ger dock en tryckökning av cirka 2 kPa/år (baserat på tom kapsel), vilket gör att vatteninströmningen kommer att avstanna innan kapseln är helt fylld med vatten.

800 till cirka 60 000 år: Vatten finns nu tillgängligt i kapseln och korrosionen av insatsen kommer därför inte att styras av vattentillgången, utan hela kapselytan kan korrodera. Ingen intransport av vatten genom defekten förväntas i det här tidsintervallet. 16 g vatten förbrukas varje år genom korrosion, vilket innebär att kapseln kommer att vara tom efter cirka 60 000 år (med förutsättningen att den nästan var fylld till att börja med). Med förutsättningen att det inte finns någon transportbegränsning mellan kanaler och spalt, kommer korrosionen att ske jämnt över hela insatsens yta. På 60 000 år korroderar 6 mm järn, vilket ger en nettotillväxt av 6,6 mm magnetit. Spalten kommer att fyllas och korrosionsprodukterna kommer att töja ut hela kopparhöljet 5,6 mm.

Mängden vatten gör att det fria utrymmet för gas är litet och trycket kommer därför att öka snabbt. När trycket inuti kapsel överskrider summan av svälltryck och hydrostatiskt tryck kommer en gaskanal att öppnas i bufferten. Denna kanal kommer sedan att stå öppen så länge som det finns vatten kvar i kapseln, alltså hela tidsintervallet.

Om skadan i kopparhöljet skulle finnas i botten svetsen i stället för locksvetsen, något som bedöms som mindre sannolikt, blir utvecklingen annorlunda. Då kan vatten pressas ut när gastrycket överstiger det hydrostatiska trycket i berget. Vattnet kommer då att försvinna mycket snabbare och någon transport av vätgas genom bufferten förväntas inte. Detta beror på att vatten kan pressas ut ur kapseln när det inre trycket överstiger det hydrostatiska trycket medan gas inte kan pressas ut förrän det inre trycket överstiger summan av det hydrostatiska trycket och buffertens svälltryck.

60 000 till 200 000 år: Under denna period finns inget vätskeformigt vatten i kapseln och korrosionen förväntas styras av indiffusion av vattenånga på samma sätt som för fallet med ett cirkulärt hål. Det här skulle möjligtvis vara en mekaniskt sett gynnsammare geometri, men det kan inte uteslutas att korrosionen kommer att ske lokalt och att en större skada kommer att bildas när kopparhöljet har töjts till brottgränsen.

200 000 till 400 000 år: Utvecklingen bedöms bli densamma som i fallet med cirkulärt hål.

400 000 till 700 000 år: Utvecklingen bedöms bli densamma som i fallet med cirkulärt hål. Allt järn bedöms dock vara förbrukat något tidigare än för fallet med cirkulärt hål, på grund av den längre tidiga perioden med global korrosion.

Osäkerheter

Beräkningar över hundratusentals år är spekulativa och ger i bästa fall en illustration av vad som kan hända.

Vid korrosionen av järninsatsen bildas magnetit med hydrauliska och mekaniska egenskaper som är avgörande för en skadad kapsels utveckling. De materialdata som används i analysen kommer från magnetit som bildats i öppna system. I en defekt kapsel kommer magnetit att bildas under högt tryck. Detta skulle kunna ha två konsekvenser:

1. Den hydrauliska konduktiviteten blir så låg att kapseln tätas och vatteninströmningen stoppas.
2. Trycket gör att magnetiten sprider sig över kapselytan istället för att byggas upp lokalt.

Dessa processer skulle vara gynnsamma för kapselns långtidfunktion, men idag finns inte tillräckligt underlag för att de ska tillgodoräknas.

Korrosionshastigheten $0,1 \mu\text{m}/\text{år}$ är väl bestämd experimentellt, men det är ändå tveksamt om man kan extrapolera den till hundratusentals år.

Andra viktiga faktorer är storlek och form på defekten i kopparhöljet. Om defekter förekommer förväntas de vara små och då har storleken begränsad betydelse för händelseförloppet: En mindre defekt ger en mindre korrosionsradie, men förväntas ändå leda till sprängning av kopparhöljet vid samma tidpunkt, eftersom tidpunkten bara beror på korrosionshastigheten.

9.6.7 Data till beräkningar av radionuklidtransport

Från den hydromekaniska utvecklingen i en skadad kapsel hämtas data för dels tidpunkten då en kontinuerlig vattenväg mellan bränsle och kapselns yttre utbildats, dels tidpunkten då den inre utvecklingen antas ha lett fram till att kapselns initialt lilla skada plötsligt växer till en större. Då den kontinuerliga vattenvägen utbildats startar radionuklidtransporten, men är begränsad av den lilla initiala skadan. Då den större skadan uppkommit antas kapseln inte längre erbjuda något motstånd mot radionuklidtransport. För båda tiderna behövs såväl rimliga som pessimistiska uppskattningar.

Som rimligt värde för tidpunkten då den initiala skadan övergår i en större väljs tiden 200 000 år, enligt redovisningen i avsnitt 9.6.6. Fram till denna tid förväntas inget vätskeformigt vatten finnas i kapseln och ingen radionuklidtransport förekommer. Då den initiala skadan övergår i en större antas också vatten kunna tränga in obehindrat och 200 000 år blir därför också den rimliga tidpunkt vid vilken en kontinuerlig vattenväg förväntas.

Pessimistiskt antas att en kontinuerlig vattenväg bildas redan efter 300 år. Beräkningen ovan, som anger 850 år som kortaste tid för att fylla kapseln med vatten har då modifierats med pessimistiska data också för buffertens vattenledningsförmåga. För skadetillväxten antas pessimistiskt att järnets korrosionshastighet är $1 \mu\text{m}/\text{år}$, vilket ger en fullbordad skadetillväxt på 20 000 år.

9.7 Kemisk utveckling i defekt kapsel

9.7.1 Överblick

Den kemiska utvecklingen i en skadad kapsel skiljer sig radikalt från den hos en intakt kapsel genom att inträngande vatten ger upphov till flera viktiga kemiska reaktioner, i huvudsak:

- Korrosion av gjutjärnsinsatsen.
- Korrosion av bränslets Zirkaloykapsling och övriga metalldelar med frisättning av radionuklider i dessa delar.
- Upplösning av bränslematrisen med åtföljande frisättning av radionuklider.
- Frisättning av omedelbart tillgänglig fraktion av radionuklider.

Utvecklingen styrs också av sammansättningen hos det vatten som tränger in via bufferten. Enligt basscenariot kan buffertens porvatten i tidiga skeden innehålla förhöjda karbonat- och sulfathalter. Vid senare tider förväntas inträngande vatten ha en sammansättning som är mycket nära den naturliga grundvattensammansättningen på den aktuella platsen.

Sammansättningen hos inträngande vatten och de påföljande reaktionerna bestämmer tillsammans den kemiska miljön i kapseln. Den kemiska miljön i sin tur avgör hur frisatta radionuklider specieras, dvs vilken kemisk form de antar och därmed också i vilken utsträckning de förekommer i löst form, tillgängliga för transport, eller fälls ut i kapseln. Specieringen har avgörande betydelse för radionuklidspridningen från en skadad kapsel.

I det följande beskrivs de fyra processerna ovan samt specieringen av radionuklider i en kapsel med skadat kopparhölje. Beskrivningarna ska ses i ljuset av föregående avsnitt, som diskuterar förutsättningen för att de över huvud taget äger rum; inträngning av vatten.

9.7.2 Korrosion av gjutjärnsinsatsen

Grundvatten på förvarsdjup är syrefritt. Gjutjärnsinsatsen kommer därför att korrodera anaeroft under vätgasutveckling och bildning av magnetit:



Korrosionsprocessen beskrivs i detalj i Processrapporten och i Blackwood m fl /1994/.

Jämviktstrycket för vätgas i den reaktionen är cirka 100 MPa. Detta betyder att jämvikt aldrig kan förväntas i ett djupförvar, eftersom bufferten förväntas släppa ut gas vid betydligt lägre tryck, se avsnitt 9.6.

Ett magnetitskikt förväntas byggas upp på järnytan. Då skiktet nått tjockleken 0,7–1 µm förväntas korrosionshastigheten vara cirka 0,1 µm/år. Korrosionshastigheten i det fortsatta förloppet har visats vara oberoende av flera viktiga faktorer /Blackwood m fl, 1994/:

- Ytterligare tillväxt av magnetitskiktet påverkar inte hastigheten. Detta tolkas som att ytterligare magnetit bildar ett skikt med dålig vidhäftning genom en utfällningsreaktion av järn i lösning, medan det inre skiktet bildas genom direktreaktion med metallytan.

- Hastigheten är oberoende av om vattnet är vätskeformigt eller i form av en gas mättad med vattenånga.
- Hastigheten påverkas inte av karbonat, nitrat eller ammoniak i vattnet.
- Ökade koncentrationer av vätgas eller järnjoner påverkar inte hastigheten, vilket tyder på att transporthastigheten över det inre magnetiskt skiktet styr processen.

Korrosionshastigheten ökar med ökande sulfathalt och jonstyrka. Vid sulfathalter på 0,1 M ligger hastigheten kring 1 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 4 000 timmar.

En konstant korrosionshastighet av 0,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ bedöms därför vara en rimlig uppskattning av den långsiktiga utvecklingen förutsatt att vatten är tillgängligt. Osäkerheten i detta värde är relativt liten och som extrema nedre och övre gränser ansätts 0,01 respektive 1 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Korrosionens betydelse för den hydromekaniska utvecklingen i kapseln utreddes i föregående avsnitt. Korrosionsprocessen och dess produkter har också betydelse för redoxförhållandena i kapseln och därmed bl a för specieringen av radionuklider, se avsnitt 9.7.6.

9.7.3 Korrosion av metalledlar och kapslingsrör

Bränsleelementen består av bränslekutsar av urandioxid, kapslingsrör av Zirkaloy samt andra strukturelement av bl a rostfritt stål samt nickellegeringarna Inconel och Incoloy /Förvarssystemrapporten/.

Metalledlar

Metallerna är mycket korrosionsbeständiga men några egentliga studier av den långsiktiga korrosionsbeständigheten hos bränslets strukturelement har inte genomförts. Korrosionsprodukternas inverkan på den kemiska miljön i kapseln bedöms som försumbar i jämförelse med effekterna av järnkorrosionen.

Korrosionens betydelse ligger i att nickellegeringarna och det rostfria stålet innehåller en viss mängd radioaktiva aktiveringsprodukter från reaktordriften, framför allt Co-60, Ni-59, Ni-63 och Nb-94.

I SR 97 antas pessimistiskt att hela nuklidinventariet i bränslets metalledlar frisätts omedelbart vid vattenkontakt. Både Ni-59 och Nb-94 har dock så långa halveringstider att en mer rimlig uppskattning av korrosionshastigheten ändå skulle leda till att huvuddelen av inventariet skulle frisättas innan nukliderna sönderfaller.

Kapslingsrör

Kapslingsrören av Zirkaloy omsluter det använda bränslet och så länge rören är täta kan inga radionuklider frisättas från bränslet. Zirkaloy passiveras av ett tunt ytskikt av zirkoniumoxid, som har mycket låg löslighet i vatten. Korrosionshastigheten för Zirkaloy kan uppskattas till 2 $\text{nm}/\text{år}$, vilket skulle ge en livslängd på 400 000 år /Processrapporten/.

Osäkerheterna när det gäller den långsiktiga korrosionsbeständigheten hos Zirkaloy är stora, eftersom alla experimentella observationer kommer från korttidsförsök. Det är också tänkbart att kapslingsrören kommer att penetreras av lokal korrosion långt tidigare.

I radionuklidtransportberäkningarna i SR 97 försummas därför kapslingsrörens barriärfunktion. Alla rör antas vara initialt defekta. Transportmotståndet i defekterna försummas också. Motståndet har begränsad betydelse om defekten i kopparhöljet är så liten att den dominerar. Om defekten i kopparhöljet är stor, skulle däremot Zirkaloykapslingen kunna utgöra ett viktigt transportmotstånd.

9.7.4 Upplösning av bränslematrisen

Majoriteten radionuklider i bränslet ligger inbäddade i bränslematrisen av urandioxid och kan inte frigöras förrän matrisen har lösts upp eller omvandlats. I en säkerhetsanalys behövs därför en beskrivning av upplösning/omvandling av bränslematrisen.

Vid normala förhållanden i förvaret (reducerande miljö, neutralt till alkaliskt pH), har urandioxid en mycket låg löslighet i vatten. Om lösligheten antas vara den begränsande faktorn kommer upplösningen av bränslematrisen att gå mycket långsamt. Baserat på detta kan en löslighetsbegränsad modell för frigörandet av radionuklider ur bränslet formuleras.

Utöver denna upplösningmekanism kan det också tänkas att oxidanter som bildas vid radiolys av vatten kring bränslematrisen kan leda till omvandling av bränslet så att inbäddade radionuklider frisätts. Baserat på detta kan en modell med bränsleomvandling till följd av radiolytisk oxidation formuleras. Detta ger ett ytterligare bidrag till upplösningen eftersom den förstnämnda mekanismen alltid förekommer.

Löslighetsbegränsad modell

Urandioxiden som bränslematrisen består av har en bestämd vattenlöslighet i den kemiska miljön i en vattenfylld, skadad kapsel. Om motsvarande uranhalt i grundvattnet i det omgivande berget är lägre, kan uran i lösning transporteras ut och man får en successiv upplösning av bränslematrisen.

Lösligheten för urandioxid i bränsle kan uppskattas till att vara 10^{-7} M /Bruno m fl, 1997/ och vattenomsättningen i kapseln kan uppskattas till mellan 0,01 och 1 liter/år, beroende på storleken hos skadan i kapselhöljet. En kapsel innehåller omkring 10 000 mol uran. Med dessa data fås en upplösning av mellan en tiomiljondel och en hundratusendel av bränslet under en miljon år.

Modell med radiolytisk oxidation

I en löslighetsbegränsad modell antas att radiolytiskt producerade oxidanter inte har någon betydelse för bränsleomvandlingen. Den stora tillgången till reducerande species i kapseln, framför allt Fe(II) och Fe(0), kan tänkas "neutralisera" effekterna av de oxidanter som alltid bildas till följd av radiolys.

Något sådant är dock idag inte experimentellt eller teoretiskt bevisat. I SR 97 används därför en modell som förutsätter att bränslematrisen upplöses både till följd av dess "egen" löslighet och av de oxidanter som produceras genom radiolys av vatten.

En modell som beskriver en radiolytisk oxidation användes först i säkerhetsanalysen SKB 91. Där antogs att oxidationen och därmed frigörelsen av radionuklider var proportionell mot α -dosraten i bränslet. Proportionalitetskonstanten härleddes ur frigörelsehastigheten för strontium-90 från bränslelaksförsök under oxiderande förhållanden /Werme m fl, 1990/. Liknande modeller har använts i studierna TVO-92

/Vieno m fl, 1992/, SITE-94 /SKI, 1996/ och senast i säkerhetsanalysen TILA-99 /Vieno och Nordman, 1999/.

Inför SR 97 har modellen utvecklats /Eriksen, 1999; Eriksen, 1996/. I den nya modellen kvantifieras:

- radiolysprocesser i vattnet mellan bränsle och kapsling,
- en rad reaktioner mellan olika radiolysprodukter i vattnet samt mellan radiolysprodukter och löst väte från korrosion av insatsen,
- reaktioner mellan oxidanter och urandioxiden, dvs den direkta orsaken till bränsleupplösningen.

Radiolysprocesser: Såväl α - som β -radiolys inkluderas. β -radiolysen producerar företrädesvis radikaler medan α -radiolysen producerar molekylära species. Beräkningarna görs med en konstant dosrat som motsvarar förhållandena vid tiden för deponering ($1,29 \cdot 10^{18}$ eV/(dm³·s) dvs 685 Gy/h).

De radiolytiska reaktionerna antas äga rum i ett 100 μ m brett vattenskikt kring bränslekutsarna. Kapslingen antas vara defekt så att vatten kan läcka in, men kapslingens långsamma korrosion gör att den antas omsluta bränslet under mycket långa tider. Det tunna vattenskiktet gör att inga koncentrationsgradienter förväntas för radiolytiskt producerade species eftersom diffusionen över 100 μ m är snabb.

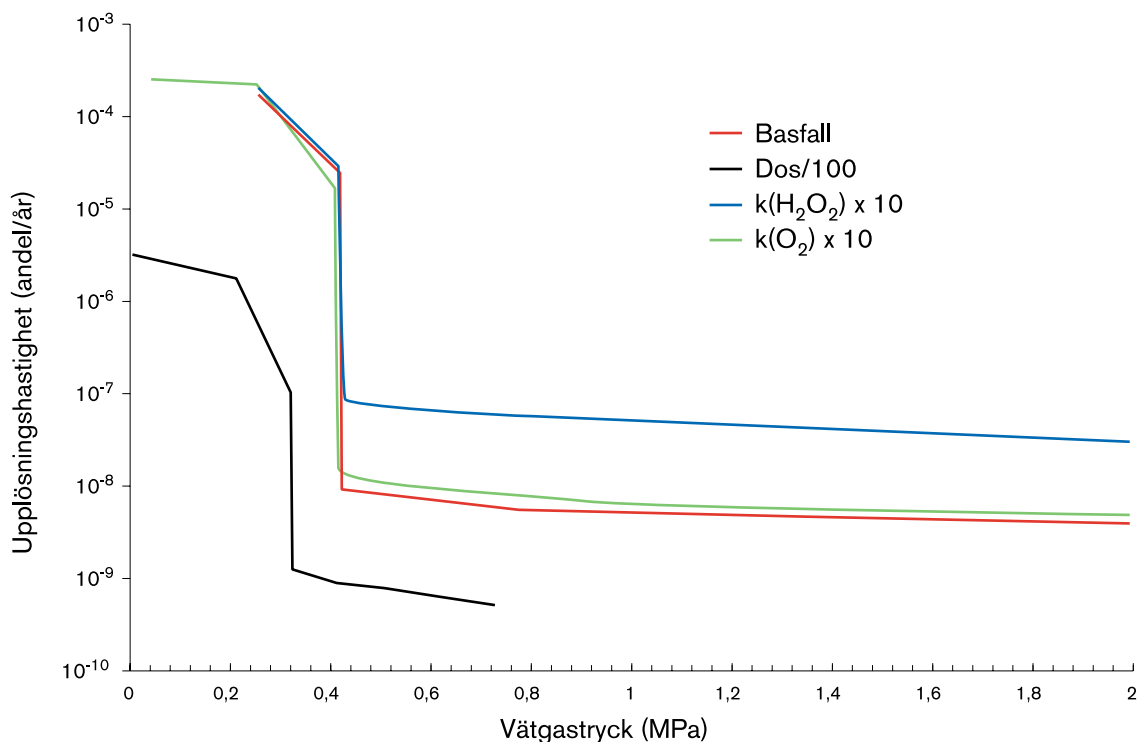
Kemiska reaktioner i vatten: Cirka fyrtio delreaktioner mellan olika radiolysprodukter, löst vätgas och vatten inkluderas i beräkningarna. Reaktioner och reaktionsdata kommer från etablerade databaser för modellering av radiolys /Ross m fl, 1992; Draganic m fl, 1991/.

Reaktioner mellan urandioxid och oxidanter: Oxidation av urandioxid orsakad av väteperoxid och molekylärt syre, H₂O₂ och O₂, beräknas i modellen. Reaktionerna antas vara av första ordningen, dvs reaktionshastigheten är direkt proportionell mot koncentrationen av ingående species. Hastigheten för reaktionerna extrapoleras från experimentellt uppmätta värden.

Beräkningar

Modellberäkningarna är genomförda med Macksima-Chemist, ett standardprogram för modellering av radiolys /Carver m fl, 1979/. För reaktionerna i vattenfasen har NDRL/NIST Solution Kinetics Database /Ross m fl, 1992/ använts tillsammans med konstanter för karbonatreaktioner från Draganic m fl /1991/. Reaktionshastigheter för reaktionen mellan O₂ och UO₂ har tagits från Torrero /1995/ och hastigheten för reaktionen mellan H₂O₂ och UO₂ har tagits från Gimenez /1996/ och Shoemith och Sunder /1992/.

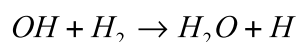
Simuleringar med modellen visar att systemet snabbt når ett stationärt tillstånd där upplösningshastigheten bestäms av bl a vätets partialtryck i kapseln och dosraten. Figur 9-11 visar upplösningshastigheten som funktion av vätgastryck. I basfallet svarar hastigheten mot att andelen 10⁻⁸ av bränslet löses upp varje år vid de vätgastryck som förväntas i kapseln (omkring 5 MPa enligt avsnitt 9.6). Här har den initiala dosraten och referensvärden på alla reaktionsparametrar använts.



Figur 9-11. Upplösningshastighet som funktion av vätgastryck vid konstant dosrat för:

- basfallet,
- 100 gånger lägre dosrat,
- tio gånger högre reaktionshastighet mellan väteperoxid och urandioxid,
- tio gånger högre reaktionshastighet mellan syremolekyler och urandioxid.

Vätgashalten har avgörande betydelse genom att väte reagerar med OH-radikalen och bildar atomärt väte:



Atomärt väte reagerar i sin tur med H_2O_2 och O_2 dvs oxidanterna förbrukas av atomärt väte i stället för att enbart reagera med bränslet.

Variationer och osäkerheter

Modellen inkluderar som nämnts ett fyrtiotal reaktioner mellan olika radiolysprodukter i vattnet. Det har inte varit möjligt att ringa in ett fåtal reaktionsparametrar som är avgörande för modellens förutsägelser. Ett antal variationer har dock genomförts för att utröna olika faktorerens betydelse:

- En sänkning av dosraten med en faktor 100 (6,9 Gy/h) ger en sänkning av omvandlingshastigheten för matrisen med en faktor tio, se figur 9-11. Summan av α - och β -dosraten sjunker ungefär en faktor 100 på 10 000 år. Förhållandet mellan α - och β -dosraten förändras över tiden. Effekterna av detta har inte analyserats i detalj. Förändringen motverkar den positiva effekten av den sänkta totaldosen.
- Upplösningshastigheten beror nästan linjärt av den antagna reaktionshastigheten mellan urandioxid och H_2O_2 , men knappast alls av reaktionen med O_2 , figur 9-11.

Osäkerheter i reaktionshastigheter: Hastigheterna för reaktionerna mellan urandioxid och oxidanterna och O_2 har tagits från experimentella mätningar. Uppmätta värden på reaktionshastigheter varierar mellan olika experiment /Bruno m fl, 1998/ med cirka en faktor tio upp och ned från det värde som valts i modellen. Betydelsen av detta har testats med variationsanalyser.

Få mätningar av hastigheten för reaktionen mellan urandioxid och H_2O_2 finns rapporterade. Mätningar har av tekniska skäl gjorts vid betydligt högre oxidantkoncentrationer än de som är aktuella i beräkningarna. En viktig fråga är därför rimligheten i extrapolationen av reaktionshastigheter till låga koncentrationer. Reaktionerna förutsätts vara av första ordningen. Andra värden på reaktionsordningen finns dock rapporterade. Shoemith och Sunder /1992/ t ex finner värden mellan noll och ett beroende på halten H_2O_2 i vattnet. Detta förklaras med att väteperoxidens sönderfall finns med som konkurrerande reaktion.

Om reaktionen skulle vara av högre ordning skulle extrapolationen till lägre oxidantkoncentrationer ge så låga oxidationshastigheter att kemisk upplösning skulle dominera dvs man närmar sig situationen med en löslighetsbegränsad modell. Om reaktionen däremot skulle vara av lägre ordning än ett skulle extrapolationen till låga oxidantkoncentrationer ge betydligt högre hastigheter.

Osäkerheter kring fysiska förutsättningar: Kommer verkligen spalten mellan kapsling och bränsle att fyllas med vatten? Spalten är 100 μm vid tillverkningen, men minskar i takt med att bränslet oxideras, på grund av uppbyggnad av sekundära uranfaser med lägre densitet. Om kapslingen försvinner blir det fria utrymmet betydligt större.

Osäkerheter kring utbytena vid radiolysreaktionerna och för hastigheterna för reaktionerna mellan de radiolytiska specierna: Osäkerheterna för de reaktioner som används i beräkningarna är små i jämförelse med många andra, framför allt geometri och reaktionshastigheter mellan uran och oxidanter.

Jämförelser

En löslighetsbegränsad modell ger en upplösning/omvandlingshastighet av mellan ungefär 10^{-11} och 10^{-13} (andel av inventariet per år), oxidationsmodellen för SR 97 ger 10^{-8} . SKB 91-modellens hastighet är tidsberoende. I originalreferensen har cirka 45 procent av bränslet omvandlats efter en miljon år och omkring 70 procent efter tio miljoner år /Werme m fl, 1990/. De stora skillnaderna behöver inte ha någon avgörande betydelse för säkerheten. För många radionuklider ger inte ens ett antagande om en omedelbart upplöst bränslamatrix några radikala förändringar i utsläppshastigheter från ett förvar. Detta av flera skäl:

- Några nuklider i bränslet ansamlas delvis på bränslets yta och frigörs därmed även om matrisen är stabil.
- Andra nuklider finns i bränslets strukturdelar och frigörs i takt med att dessa korroderar, vilket bedöms vara en snabbare process än matrisupplösningen.
- Flera helt matristrogna nuklider, som plutonium, har mycket låga individuella lösligheter och faller ut i fasta faser även om matrisen löses upp snabbt. Detta ger en mycket långsam frigörelse av sådana nuklider.

Nuklider som förekommer i låga halter i bränslet, t ex Ra-226 och Am-241, påverkas dock avsevärt av olika matrisomvandlingshastigheter, eftersom en låg omvandlingshastighet gör att det tar mycket lång tid för en sådan nuklid att nå sin mättnadskoncentration i kapseln. I fallet Am-241 innebär en omvandlingshastighet av 10^{-8} att den aldrig kommer att nå sin mättnadskoncentration. Ra-226 produceras genom kedjesönderfall i bränslematrisen så länge matrisen (U-238) finns kvar. Bränsleupplösningshastigheten blir här avgörande för i vilken takt Ra-226 frisätts i kapseln. I beräkningarna av radionuklidtransport visas i avsnitt 9.11.10 betydelsen av bränsleupplösningen med ett specialfall där bränslet tänks bli omedelbart upplöst då det kommer i kontakt med vatten.

Naturlig analogi

Den modell som användes för säkerhetsanalyserna SKB 91 överskattar kraftigt oxidationshastigheten för bränslet. Med ansatserna i SKB 91 blir bränsleupplösningshastigheten på lång sikt sådan att en fullständig upplösning kan förväntas om cirka 170 miljoner år. På lång sikt bör förhållandena i bränslet vara jämförbara med dem vid uranfyndigheten vid Cigar Lake vilken i stort sett är intakt ännu efter mer än en miljard år.

Modellen till SR 97 är ett försök att ge en fullständigare och mer realistisk beskrivning av den radiolytiska oxidationen av bränslet. Om antagandena i SR 97 modellen skulle tillämpas på Cigar Lake skulle detta ge en fullständig oxidation på 100 miljoner år. Detta antyder att modeller med radiolytisk oxidation överskattar oxidationen för långa tidsförlopp.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Baserat på resultaten ovan har en hastighet som motsvarar upplösning av andelen 10^{-8} av bränslematrisen varje år valts för beräkningarna av radionuklidtransport i SR 97.

9.7.5 Upplösning av gapinventarium

Huvuddelen av radionukliderna i bränslet är jämnt fördelade i UO_2 matrisen och frigörs i takt med att bränslet löses upp (se föregående avsnitt). En liten andel av inventariet av ett fåtal radionuklider har under reaktordriften utskiljts till gapet mellan bränsle och kapslingsrör och möjligen också till korngränser i bränslet.

Vid kontakt med vatten kan dessa radionuklider snabbt gå i lösning. Mängden frigjord aktivitet bestäms av lösligheten och tillgängligheten på utskiljt material. En utredning om frigörelse från utskiljningar i bränsle har gjorts av Johnson och Tait /1997/. Från den rapporten har realistiska och konservativa data valts för nuklidtransportberäkningarna i SR 97 /Datarapporten/.

9.7.6 Kemisk speciering av radionuklider

I löslighetsberäkningar ansätts en löslighetsbegränsande fas för varje radioelement. Den termodynamiskt mest stabila fasen (som skulle resultera i de lägsta lösligheterna) väljs inte alltid; snarare väljs faser som med stor säkerhet kan bildas under de förhållanden som råder. I löslighetsberäkningarna bestäms, förutom värdet på radioelementets löslighet, också specieringen i vattenfasen. Specieringen har betydelse för lösligheten, men också för radionuklidens transportegenskaper i buffert och berg.

Inför SR 97 har ett omfattande arbete gjorts för att bestämma lösligheter och de osäkerheter som finns förknippade med dessa:

- Utvärdering av betydelsen av den naturliga sammansättningen av grundvattnet och den relativa betydelsen av olika specier, för att få en uppfattning om vilka komplex och fasta faser som kommer att dominera.
- En omfattande litteraturstudie över halter av (stabila isotoper av) de viktiga radioelementen, för att bedöma rimligheten i de framräknade lösligheterna.
- Genomgång av tillgängliga data från bränslelakförsök av halter av icke-naturliga radioelement för att också där få en uppfattning av rimligheten i de framräknade lösligheterna.
- Beräkning av lösligheter med jämviktsmodellen EQ3NR för alla tre referensvattnen i SR 97 samt ett antaget bentonitporvatten.
- Jämförelse av de framräknade resultaten med naturliga halter, halter i laklösningar samt resultat från andra säkerhetsanalyser.
- En känslighets/osäkerhetsstudie för att bestämma vilka parametrar som är viktiga för varje radionuklid. De tre platsspecifika grundvattnen i SR 97 är sinsemellan mycket olika och löslighetsberäkningarna med dessa vatten ger därför en bild om hur radionuklidlösligheterna kan tänkas variera mellan olika platser. Förutom beräkningarna för de olika referensvattnen har betydelsen av rimliga variationer i de viktigaste parametrarna (pH, Eh, karbonathalt och temperatur) studerats. Vad gäller temperatur har 25 °C valts som referens och 60 °C och 15 °C har använts som variationer.

Hela studien finns rapporterad i Bruno m fl /1997/. Baserat på den rapporten har platsspecifika rimliga och pessimistiska data valts för nuklidtransportberäkningarna, se Datarapporten. De pessimistiska värdena har valts utifrån resultaten från variationsanalyserna. Tabell 9-1 visar löslighetsbegränsande fasta faser, speciering och platsspecifika lösligheter.

Nedan följer en kort redovisning av använda lösligheter för de olika radioelementen baserat på Bruno m fl /1997/ och Processrapporten.

Kol, Klor, Krypton, Jod och Cesium

Det är inte troligt att något av dessa element bildar fasta faser med en så låg löslighet att det får någon betydelse i säkerhetsanalysen.

Kol skulle kunna begränsas genom isotoputbyte i karbonater (kalцит). Det är dock svårt att säkert bestämma i vilken utsträckning detta sker och därför används ingen löslighetsbegränsning för kol i SR 97.

Nickel

Sulfider, silikater och blandade oxider med järn och nickel är alla mycket svårlösliga. Det är dock svårt att garantera att någon av dessa faser kommer att bildas i förvaret och därför antas nickelkoncentrationen begränsas av lösligheten av nickeloxid (NiO). Lösligheten sjunker med ökande pH, men är relativt oberoende av andra parametrar. I samtliga referensvattnen i SR 97 är dock lösligheten så hög att den saknar praktisk betydelse. I vattenfasen dominerar den fria nickeljonen och karbonatkomplexet NiCO_3 .

Tabell 9-1. Löslighetsbegränsande faser, specieringar och lösligheter för de tre förvarsplatserna i SR 97.

Element	Löslighetsbegränsande fas	Dominerande specie	Aberg Rimligt (mol/l)	Beberg Rimligt (mol/l)	Ceberg Rimligt (mol/l)	Alla platser Pessimistiskt (mol/l)
Ag	AgCl	AgCl _x ⁻	2,96 · 10 ⁻⁵	9,39 · 10 ⁻⁷	7,12 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁵
Am	AmOHCO ₃	Am(OH) ₂ ⁺ , AmCO ₂ ⁺ , AmOH ²⁺	6,87 · 10 ⁻⁷	9,36 · 10 ⁻⁸	9,34 · 10 ⁻⁸	7 · 10 ⁻⁶
Cm	CmOHCO ₃	CmOH ²⁺	2,22 · 10 ⁻⁷	2,02 · 10 ⁻⁹	9,01 · 10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻⁶
Ho	Ho ₂ (CO ₃) ₂	HoCO ₃ ⁺ , Ho(CO ₃) ₂ ⁻	6,27 · 10 ⁻⁶	5,58 · 10 ⁻⁶	5,58 · 10 ⁻⁶	6 · 10 ⁻⁵
Nb	Nb ₂ O ₅	NbO ₃ ⁻	1,37 · 10 ⁻³	1,37 · 10 ⁻³	1,39 · 10 ⁻³	4 · 10 ⁻²
Ni	NiO	Ni ²⁺ , NiCO ₃	hög	hög	hög	hög
Np	Np(OH) ₄	Np(OH) ₄ , Np(OH) ₃ CO ₃ ⁻ , Np(HPO ₄) ₄ ⁶⁻	5,87 · 10 ⁻⁸	1,05 · 10 ⁻⁷	5,87 · 10 ⁻⁸	2 · 10 ⁻⁷
Pa	Pa ₂ O ₅	PaO ₂ OH	3,16 · 10 ⁻⁷	3,16 · 10 ⁻⁷	3,16 · 10 ⁻⁷	4 · 10 ⁻⁷
Pd	PdO	Pd(OH) ₂	4,21 · 10 ⁻⁹	4,17 · 10 ⁻⁹	4,18 · 10 ⁻⁹	8 · 10 ⁻⁹
Pu	Pu(OH) ₄	Pu(OH) ₄ , PuCO ₃ ⁺ , Pu ³⁺	6,56 · 10 ⁻⁹	5,35 · 10 ⁻¹⁰	1,38 · 10 ⁻¹⁰	3 · 10 ⁻⁶
Ra	RaSO ₄	Ra ²⁺ , RaSO ₄	2,86 · 10 ⁻⁷	5,02 · 10 ⁻⁷	1,20 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴
Se	FeSe ₍₂₎ /Selen	HSe ⁻	2,59 · 10 ⁻⁹	2,59 · 10 ⁻⁹	2,59 · 10 ⁻⁹	hög
Sm	Sm ₂ (CO ₃) ₂	SmCO ₃ ⁺ , Sm(CO ₃) ₂ ⁻	2,13 · 10 ⁻⁶	8,03 · 10 ⁻⁷	8,03 · 10 ⁻⁷	2 · 10 ⁻⁵
Sn	SnO ₂	Sn(OH) ₄ , Sn(OH) ₅ ⁻	5,52 · 10 ⁻¹⁰	6,03 · 10 ⁻¹⁰	4,68 · 10 ⁻⁹	1 · 10 ⁻⁵
Sr	Celestit/ Strontianit	Sr ²⁺	6,88 · 10 ⁻³	3,09 · 10 ⁻³	1,21 · 10 ⁻⁴	4 · 10 ⁻²
Tc	TcO ₂	TcO(OH) ₂	7,67 · 10 ⁻⁹	7,92 · 10 ⁻⁹	7,67 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁸
Th	Th(OH) ₄	Th(OH) ₄ , Th(HPO ₄) ₃ ²⁻	1,22 · 10 ⁻⁹	1,22 · 10 ⁻⁹	1,22 · 10 ⁻⁹	2 · 10 ⁻⁹
U	UO ₂	U(OH) ₄	1,28 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	2 · 10 ⁻⁷
Zr	ZrO ₂	Zr(OH) ₄	2,48 · 10 ⁻⁹	2,51 · 10 ⁻⁹	2,51 · 10 ⁻⁹	3 · 10 ⁻⁹

Selen

Under de förhållanden som råder i förvaret kommer selenkoncentrationen att styras av lösligheten av järnseleniderna FeSe och FeSe₂. En sänkning av pH med en enhet ökar lösligheten med en storleksordning. I samtliga referensvatten är lösligheten dock mycket låg, under 10⁻⁸ mol/l. I vattenfas förekommer selen som HSe⁻. Resonemanget baseras på att selen inte kommer att oxideras irreversibelt i förvaret. Om så skulle vara fallet blir lösligheten mycket hög. Konsekvenserna av detta studeras i ett separat beräkningsfall.

Strontium

Celestit och strontianit är de två mest svårslösliga strontiumfaserna under förvarsförhållanden. Deras relativt höga lösligheter gör dock att strontium aldrig kommer att vara löslighetsbegränsat. I vattenfasen dominerar den fria jonen Sr²⁺.

Zirkonium

I SR 97 antas att zirkoniumkoncentrationen begränsas av lösligheten av den amorfa zirkoniumoxiden ZrO_2 . Denna fas har mycket låg löslighet och lösligheten är okänslig för variationer i grundvattensammansättningen. I vattenfasen dominerar hydroxidkomplexet $Zr(OH)_4$.

Niob

Nb_2O_5 har ansatts som den löslighetsbegränsande fasen för niob i SR 97. Lösligheten ökar med ökande pH, vilket gör att lösligheten i referensvattnet för Ceberg blir mycket hög. Hydroxidkomplexen $Nb(OH)_6^-$ och $Nb(OH)_5$ dominerar i lösning. Det finns brister i den termodynamiska databasen för niob, vilket gör att de beräknade lösligheterna och specieringarna är mycket osäkra. De relativt höga värdena på lösligheten tillsammans med det lilla inventariet gör dock att lösligheten inte är någon viktig barriärfunktion.

Teknetium

Teknetium förekommer i metallisk form i bränslet och metallens löslighet är mycket låg. Trots att metallen är stabil under förvarsförhållanden bildas den knappast genom utfällningsreaktioner. I SR 97 antas därför att oxiden $TcO_2 \cdot xH_2O$ är löslighetsbegränsande fas. Lösligheten av denna fas är oberoende av variationer i grundvattensammansättning, men påverkas av temperaturen, på så sätt att en sänkning från 60 °C till 15 °C sänker lösligheten med en storleksordning. Komplexet $TcO(OH)_2$ dominerar i vattenfasen.

Palladium

Palladium förekommer liksom teknetium i metallisk form i det använda bränslet, men även här används den mer lösliga oxiden som löslighetsbegränsande fas i SR 97. Den är mycket okänslig för variationer i grundvattensammansättningen. Det neutrala hydroxidkomplexet $Pd(OH)_2$ dominerar, men kloridkomplexet $PdCl_4^{2-}$ kan vara viktigt vid lägre pH och högre kloridhalter.

Tenn

SnO_2 ansätts som löslighetsbegränsande fas. Lösligheten hos denna fas ökar med pH. I Bruno m fl /1997/ ökar lösligheten kraftigt med temperaturen. Detta beror dock på en felaktighet i temperaturkorrektionen för det dominerande komplexet. Senare studier /Amaya m fl, 1997/ har visat att tenns löslighet kan vara högre än det som anges i Bruno m fl /1997/. Den pessimistiska löslighet som används i SR 97 är därför fortfarande relevant. I vattenfasen dominerar hydroxidkomplexen $Sn(OH)_5^-$ och $Sn(OH)_4$.

Radium

Den mest stabila radiumfasen är radiumsulfat. Förändringar i pH och temperatur påverkar lösligheten, men inte i någon betydelsefull omfattning. Halten sulfat i vattnet har däremot stor betydelse för lösligheten, vilket gör att löslighetsgränsen i det mycket jonfattiga (sulfatfattiga) Cebergvattnet blir betydligt högre än i de andra referensvattnen. Mängden radium i en kapsel är dock så liten att det är osannolikt att koncentrationen någon gång kan nå mättnadsgränsen för radiumsulfat i något av referensvattnen. Det är å andra sidan troligt att radium kommer att fällas ut tillsammans med något annat ämne,

t ex i calcit, vilket i så fall skulle kunna sänka radiumkoncentrationen i kapseln. Detta behandlas dock inte i beräkningarna i SR 97. I vattenfasen dominerar den fria radiumjonen.

Torium

Toriumkoncentrationen begränsas av lösligheten av $\text{Th}(\text{OH})_4$. I SR 97 beräknas lösligheten utifrån den amorfa fasen. Dess löslighet är i princip opåverkad av variationer i grundvattensammansättningen. I vattenfasen dominerar hydroxidkomplexet $\text{Th}(\text{OH})_4$. Torium kan bilda starka fosfatkomplex, men fosfathalterna i svenska grundvatten är så låga att dessa saknar betydelse.

Protaktinium

Pa_2O_5 har satts som löslighetsbegränsande fas för protaktinium i SR 97. Dess löslighet påverkas inte av variationer i grundvattensammansättningen. Den termodynamiska databasen för protaktinium som har använts i den här analysen är dock inte så komplett som den borde vara, särskilt inte för redoxjämvikten $\text{Pa}(\text{IV})/\text{Pa}(\text{V})$. Den beräknade lösligheten för Pa_2O_5 är $3 \cdot 10^{-7}$ mol/l, medan lösligheten för PaO_2 under liknande förhållanden är $5 \cdot 10^{-11}$ mol/l /Berner, 1994/. Lösligheten för protaktinium i SR 97 är därför pessimistisk. I vattenfasen dominerar komplexet PaO_2OH , men även detta förutsätter att protaktinium är femvärt.

Uran

Under de förhållanden som råder i förvaret förväntas uran alltid falla ut som fyrvärda faser. Urandioxid har en löslighet av cirka 10^{-10} mol/l, men i SR 97 används i stället lösligheten av en hypotetisk fas, kallad $\text{UO}_2(\text{fuel})$, vars löslighet är baserad på mätningar av urankoncentrationer i lösningar från bränslelakförsök. Anledningen till detta val är att urandioxiden i det använda bränslet kan vara aningen oxiderad på ytan på grund av radiolysoxidanter: (UO_{2+x}) där $0 < x < 0,35$. Denna fas ger ett mycket pessimistiskt värde på lösligheten. Värdet är okänsligt för förändringar i grundvattensammansättningen och påverkas endast marginellt av temperaturen. I vattenfasen dominerar $\text{U}(\text{OH})_4$.

Neptunium

Liksom för uran är den fyrvärda formen av neptunium stabil under förvarsförhållanden. Den amorfa hydroxiden $\text{Np}(\text{OH})_4$ ansätts som löslighetsbegränsande fas. Till skillnad från uran kan dock karbonatkomplex vara viktiga i vattenfasen, vilket gör att neptuniums löslighet påverkas av halten karbonat i vattnet. I vattenfasen dominerar $\text{Np}(\text{OH})_4$ vid lågre karbonathalter och $\text{Np}(\text{OH})_3 \text{CO}_3^-$ vid högre.

Plutonium

Den amorfa hydroxiden $\text{Pu}(\text{OH})_4$ ansätts som löslighetsbegränsande fas. Dess löslighet ligger i storleksordningen 10^{-10} mol/l och ökar relativt snabbt med sjunkande Eh/pH. Detta beror på en stabilisering av trevärt plutonium i vattenfasen.

Vid de redoxförhållanden som naturligt råder på de tre platserna i SR 97 är en fyrvärd fast plutoniumfas stabil. Det är dock möjligt att gjutjärnsinsatsen kan påverka redoxförhållanden på ett sådant sätt att den fyrvärda fasen destabiliseras och att en trevärd fas kommer att styra plutoniums löslighet. För att få en rimlig uppskattning av plutoniums

löslighet vid dessa förhållanden bör därför en trevärd fast fas väljas: Data för PuOHCO_3 /från Puigdomenéch och Bruno, 1991/ ger då en löslighet som är lägre än för den fyrvärda fasen. Om plutonium kommer att bilda tre- eller fyrvärda fasta faser är inte fullständigt utrett och i SR 97 används värden från den fyrvärda fasen.

Specieringen i vattenfas är också känslig för variationer i Eh/pH. Vid starkt reducerande förhållanden dominerar den fria trevärda jonen Pu^{3+} och karbonatkomplexet PuCO_3^+ , medan det fyrvärda hydroxidkomplexet $\text{Pu}(\text{OH})_4$ (aq) dominerar vid högre redox-potential.

Americium och curium

Americium och curium har liknande kemiska egenskaper och hydroxikarbonaterna AmOHCO_3 och CmOHCO_3 är löslighetsbegränsande faser. Lösligheten av dessa faser sjunker med ökande pH och karbonathalt, men effekten är relativt begränsad i de studerade intervallen. Faserna bildas sannolikt som samfällningar med varandra, vilket gör att curiums löslighet ytterligare begränsas. Denna effekt tillgodoräknas dock inte i SR 97. I vattenfasen dominerar AmOH^+ , AmCO_3^+ och $\text{Am}(\text{OH})_2^+$ för americium och CmOH^+ för curium.

Slutsatser om lösligheter

I löslighetsberäkningarna i SR 97 har genomgående ”pålitliga”, pessimistiska löslighetsbegränsande faser valts. De verkliga koncentrationerna av radionuklider i en vattenfylld kapsel kan i många fall vara flera storleksordningar lägre än de som används i radionuklidtransportberäkningarna. De känslighetsanalyser som gjorts med avseende på grundvattnets sammansättning visar att lösligheterna i de flesta fall är relativt okänsliga även för betydande förändringar i vattensammansättning. Detta är viktigt eftersom grundvattensammansättningen i förvaret kommer att förändras under dess livslängd.

9.7.7 Data till beräkningar av radionuklidtransport

I det följande sammanfattas hur data för bränsleupplösning och lösligheter valts till beräkningar av radionuklidtransport.

Bränsleupplösning

En hastighet som motsvarar upplösning av andelen 10^{-8} av bränslematrisen varje år har valts för beräkningarna av radionuklidtransport i SR 97. Konsekvenser av andra antaganden om bränsleupplösningen illustreras med specialfall.

Upplösning av gap-inventarium (IRF)

Bästa uppskattningar av andelen aktivitet i inventariet som är omedelbart tillgängligt (IRF) för olika nuklider i det använda bränslet uppskattas från mätningar av frigörelse av fissionsgaser från representativt svenskt BWR bränsle, kombinerat med resultat från upplösningsförsök på LWR och CANDU bränsle /Johnsson och Tait, 1997/. Pessimistiska värden uppskattas genom att välja de högsta värden på IRF som har bestämts i dessa studier. För de nuklider som bara förekommer på metalldelarna (Nb-94, Ni-59 och Ni-63) ansätts att all aktivitet är omedelbart tillgänglig även om stålet har en begränsad upplösningshastighet. För C-14 ansätts dock lägre värden på IRF eftersom en stor del av aktiviteten finns i bränslet och i bränsleinkapslingen /Anttila, 1992/.

Tabell 2-3 i bilaga 2 visar de använda värdena på IRF. Värdena är inte korrelerade till övriga indata till transportmodellerna.

Lösligheter

Med hjälp av specieringskoden EQ3NR beräknas lösligheter för olika specier i referensvatten för Aberg, Beberg, Ceberg (se kapitel 8), och för ett speciellt bentonitvatten /Bruno m fl, 1997/. Bruno m fl har också studerat lösligheternas känslighet för variationer i pH, Eh, karbonathalt och temperatur. Valet av lösligheter för transportberäkningarna diskuteras i Datarapporten.

Rimliga värden för lösligheterna väljs från lösligheterna som beräknats för respektive referensvatten, men om lösligheten för något ämne är högre i bentonitvattnet väljs detta värde som det rimliga.

Med tanke på osäkerheten i den framtida kemiska miljön inne i kapseln väljs de pessimistiska lösligheterna genom att för respektive ämne välja den högsta lösligheten som beräknats för någon av de olika vattensammansättningarna. Om känslighetsberäkningarna visar att lösligheterna skulle kunna vara ännu större väljs dessa värden.

De föreslagna lösligheterna, liksom löslighetsbegränsande fas för de rimliga värdena framgår av tabell 9-1 liksom av tabell 2-5 i bilaga 2. Lösligheterna beror på porvattnets kemiska sammansättning. Lösligheterna är därmed principiellt korrelerade till andra indata som beror på de kemiska förhållandena (sorption- och diffusivitetsdata). Men osäkerheten i grundvattenkemi, och de olika förhållanden som samtidigt kan råda inne i kapseln och ute i berget gör att denna korrelation inte är speciellt stark.

9.8 Hydraulisk utveckling i geosfären

Grundvattenrörelserna och deras förändringar i tiden bestäms av geosfärens hydrauliska egenskaper och förhållanden i omgivningen, framför allt nederbörden som i sin tur beror av klimatet. Eftersom dessa faktorer postuleras vara desamma som i basscenariot förväntas också samma hydrauliska utveckling som i basscenariot, dvs:

- ett inledande transient skede där geosfären efter förvarets förslutning återmättas med vatten,
- följt av ett långsiktigt skede där förhållandena liknar de ostörda, naturliga som rådde innan förvaret byggdes. Dessa förhållanden förväntas vara väsentligen oförändrade över lång tid med undantag för mindre effekter av kända trender som landhöjning.

Beskrivningen av den hydrauliska utvecklingen i den regionala skalan för de tre platserna finns i basscenariot, avsnitt 8.7.2 och är alltså giltig även för kapseldefektsscenariot.

För kapseldefektsscenariot krävs i en lokal skala en mer detaljerad beskrivning av det långsiktiga skedet än vad som gavs i basscenariot. Den större detaljeringsgraden är viktig för att ge en bra beskrivning av eventuell radionuklidtransport från förvaret.

Detta avsnitt ger en sammanfattning av detaljerade modelleringar av det stationära skedet i lokal skala för Aberg, Beberg och Ceberg. Först beskrivs modelleringsmetodik och använd numerisk modell, sedan följer en genomgång av de enskilda platserna. Här betonas de olika basfall och modellvarianter som har analyserats, samt jämförelser av resultat.

9.8.1 Metod och modellverktyg

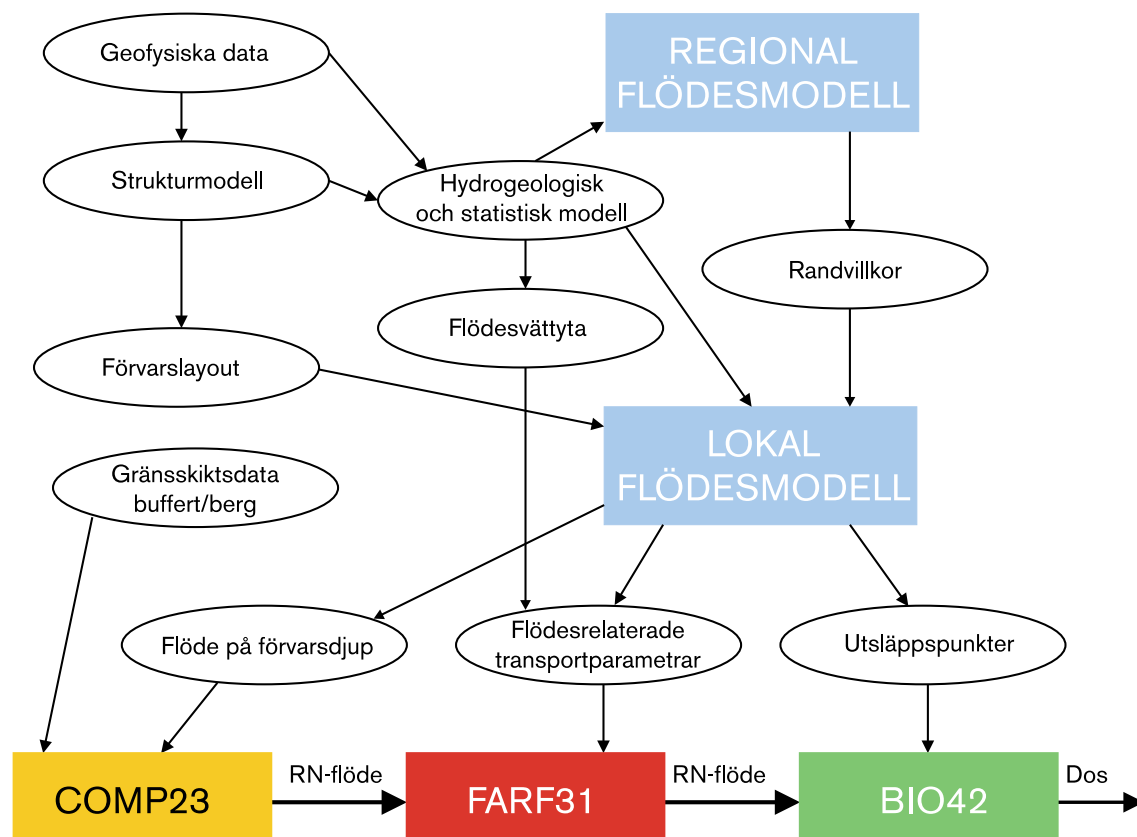
Metod

I Datarapporten diskuteras kopplingar mellan modeller och data för modellering av grundvattenflöde i geosfären, se figur 9-12. Modelleringen av grundvattenströmning delas upp i en regional och en lokal modell. Den lokala modellen utgör en förfining av detaljeringsnivån närmast förvaret.

Geofysiska data samt övrig tillgänglig information från t ex lineamentstolkningar och analys av borrhålskärnor används för att upprätta en geologisk strukturmodell, se figur 9-12. Strukturmodellen är en sammanställning av sprickzonernas läge och geometrier på en plats, ibland också en kvantitativ beskrivning av zonernas hydrogeologiska egenskaper. Upprättandet av strukturmodellen görs delvis som expertbedömningar och ger därför kvalitativa osäkerheter. Dessa diskuteras i detalj i Datarapporten.

Baserat på strukturmodellen läggs det hypotetiska förvaret in i den tillgängliga bergvolymen. Konsekvenserna av utformningen studeras i säkerhetsanalysen med hjälp av modeller för grundvattenströmning i lokal skala och radionuklidtransport.

Geofysiska data och strukturmodeller används också till statistiska hydrogeologiska beskrivningar för användning i både de regionala och lokala skalorna. Beskrivningarna sammanfattar data som behövs för att sätta upp numeriska modeller, t ex information om borrhål, utvärderade konduktivitetsvärden samt statistiska egenskaper för både sprickzoner och intakt berg (bergmassa). Även i detta skede ger expertbedömningar kvalitativa osäkerheter, se Datarapporten.



Figur 9-12. Kopplingar mellan data och modeller för grundvattenströmning i regional och lokal skala.

Baserat på den hydrogeologiska beskrivningen och randvillkor simuleras grundvattenströmning i den regionala skalan. Resultat från den regionala modellen används som randvillkor i den lokala modellen. Randvillkoren och den hydrogeologiska beskrivningen i lokal skala utgör indata för den lokala modellen. Denna ger i sin tur resultat som används för beräkningar av radionuklidtransport i kapsel, buffert, geosfär och biosfär, se figur 9-12.

Modellverktyg

De primära storheter som beräknas med modellerna i den lokala skalan är:

- specifikt vattenflöde (darcyhastighet) på förvarsdjup [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$],
- partikelbanor och advektiva gångtider från kapselpositioner till randen mellan geosfär och biosfär (år),
- koordinater för utsläppspunkter vid markytan.

Den advektiva gångtiden är en teoretisk storhet som används för att föra över beräkningsresultat från hydromodeller till transportmodeller. Där kan gångtiderna användas för att beräkna tiden för transport av lösta ämnen från förvarsdjup till ytan. Dessa är ofta flera storleksordningar längre än de advektiva gångtiderna.

Följande modeller har använts för att beräkna storheterna:

- HYDRASTAR, en finit differensmodell för stokastisk kontinuumsimulering av grundvattenströmning och advektiv transport.
- CHAN3D, en kanalnätverksmodell för simulering av grundvattenströmning och transport,
- FracMan/MAFIC/PAWorks, ett programpaket för stokastisk simulering av grundvattenströmning och transport i diskreta spricknätverk,
- NAMMU, en kontinuum modell för grundvattenströmning och transport baserad på den finita elementmetoden.

HYDRASTAR är huvudalternativet som använts inom SR 97 i den lokala skalan; de övriga modellerna har använts för kompletterande studier. Nedan beskrivs kort HYDRASTAR; övriga modeller beskrivs bl a i säkerhetsrapporten SR 95 /SKB, 1995/.

HYDRASTAR är en tredimensionell finit differensmodell för stokastisk kontinuumsimulering av grundvattenströmning. Strömningen drivs av skillnader i hydraulisk potential; densitetsdriven strömning orsakad av skillnader i salinitet kan inte beräknas. Modellen har verifierats i ett antal studier, se t ex Norman /1991/, Morris och Cliffe /1994/ samt Walker m fl /1996/.

Den hydrauliska konduktiviteten beskrivs som en rumsligt korrelerad stokastisk process och antas vara logaritmiskt normalfördelad med given korrelationsstruktur. De nödvändiga parametrarna för beskrivningen fås genom geostatistisk analys. Berget kan dessutom delas upp i domäner med olika medelvärden för den hydrauliska konduktiviteten. Denna funktion kan användas för att skilja områden med bergmassa från partier med högre konduktivitet, t ex sprickzoner. De genererade hydrauliska konduktivitetfälten kan betingas mot uppmätta konduktivitetvärden från borrhålstester. För uppskalning av hydrauliska konduktivitetsdata från mätskala till diskretiseringsskala används en empirisk metod baserad på data från Äspö /Rhén m fl, 1997/.

Advektion simuleras i modellen med partiklar som transporteras opåverkade genom det beräknade hastighetsfältet. Gångtiderna beräknas med konstant flödesporositet, pessimistiskt antagen till 10^{-4} . Andersson m fl /1998/ rekommenderar värden i intervallet 10^{-4} – 10^{-2} för samtliga tre platser. Därför är gångtiderna i verkligheten förmodligen längre än de som beräknas i SR 97, se vidare avsnitten 9.8.3 och 9.9.7.

9.8.2 Modellapplikation

I det följande visas hur HYDRASTAR används i den lokala skalan för de tre platserna. En utförligare diskussion för Aberg, Beberg och Ceberg finns i Walker och Gylling /1998/, Gylling m fl /1999a/ respektive Walker och Gylling /1999/. I figurer i avsnitt 8.7.2 visas modellområdena i både de regionala och lokala skalorna för de tre platserna. Mycket av indata finns i avsnitt 6.5 samt i Förvarssystemrapporten.

För samtliga platser delas berget upp i bergmassa och sprickzoner. Sprickzoner representerar geometriskt deterministiska strukturer med förhöjd vattengenomsläpplighet medan bergmassan representerar det mer eller mindre intakta berget mellan strukturerna. Indelningen i bergmassa och sprickzoner baseras på den geologiska strukturmodell som upprättats för platsen. De hydrogeologiska egenskaperna (hydraulisk konduktivitet) skiljer sig inte enbart mellan sprickzoner och bergmassa, utan även t ex olika volymer för bergmassa kan ha olika egenskaper.

HYDRASTARs modellvolym diskretiseras i kubiska element, alla med samma storlek. Modellbeskrivningarna är sammanfattade i tabell 9-2. Parametervärden är hämtade från avsnitt 3.5 i Walker och Gylling /1998/ för Aberg, avsnitt 3.5 i Gylling m fl /1999a/ för Beberg och avsnitt 3.5 i Walker och Gylling /1999/ för Ceberg. Medelvärdet för hydraulisk konduktivitet varierar mellan sprickzonerna vid varje plats såsom framgår av variationsområdet för olika sprickzoners medelvärde. Variationsområdena representerar sprickzonerna med lägsta respektive högsta medelvärde. Den hydrauliska konduktiviteten vid Aberg reduceras med en faktor tio under –600 meter över havet. Vid Beberg

Tabell 9-2. Viktiga modellparametrar för de tre platserna.

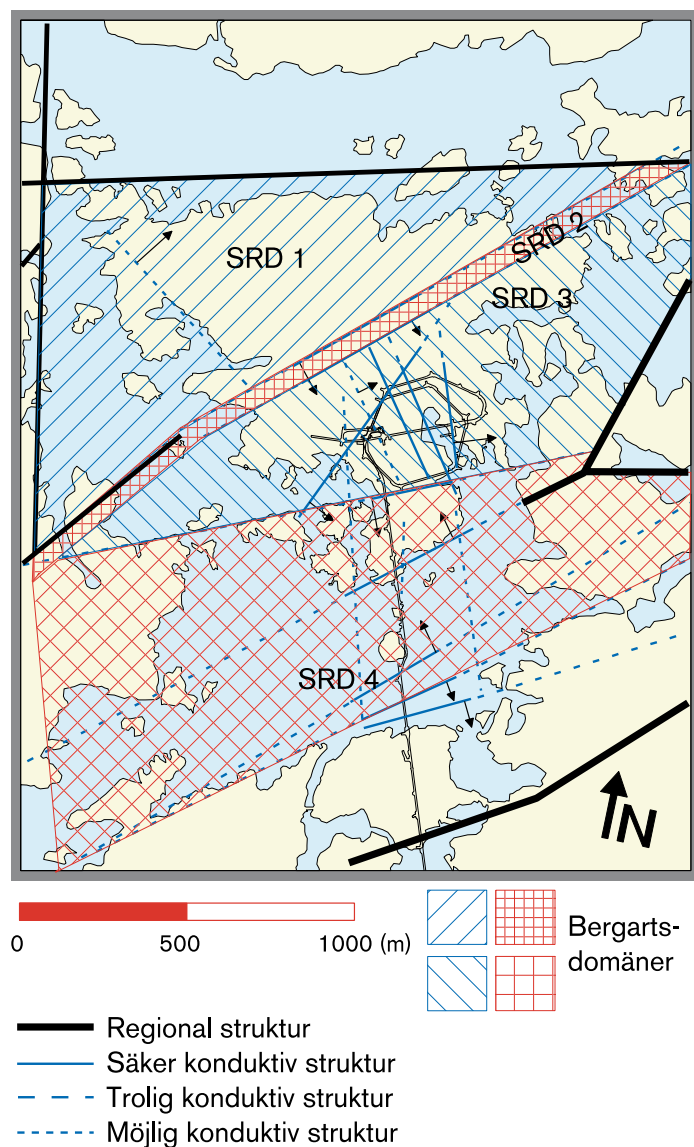
	Aberg	Beberg	Ceberg
Elementstorlek (m)	25	35	35
Yta, djup (m)	2 400 x 2 200, 1 250	4 130 x 5 355, 1 505	6 510 x 4 290, 1 190
Medelvärde av $\log_{10}K$ (m/s) för bergmassa	SRD1: -8,0 SRD2: -7,1 SRD3: -8,8 SRD4: -7,5 SRD5: -7,6 Övriga: -8,5	SRD norra: -6,4 SRD södra: -6,8 SRD övrig: -7,2	+110 till 0: -7,4 0 till -100: -8,9 -100 till -300: -9,9 under -300: -10,1
Variationsområde för medelvärde av $\log_{10}K$ (m/s) mellan olika sprickzoner	-8,3 till -5,3	-7,5 till -4,3	-9,6 till -6,9
Standardavvikelse av $\log_{10}K$ för bergmassa och sprickzoner	1,6	0,8	1,1
Korrelationslängd (practical range) (m)	97	247	68

reduceras den hydrauliska konduktiviteten med en faktor 12,3 under -100 meter över havet. Korrelationsstrukturen beskrivs med exponentiella isotropiska modeller för samtliga platser.

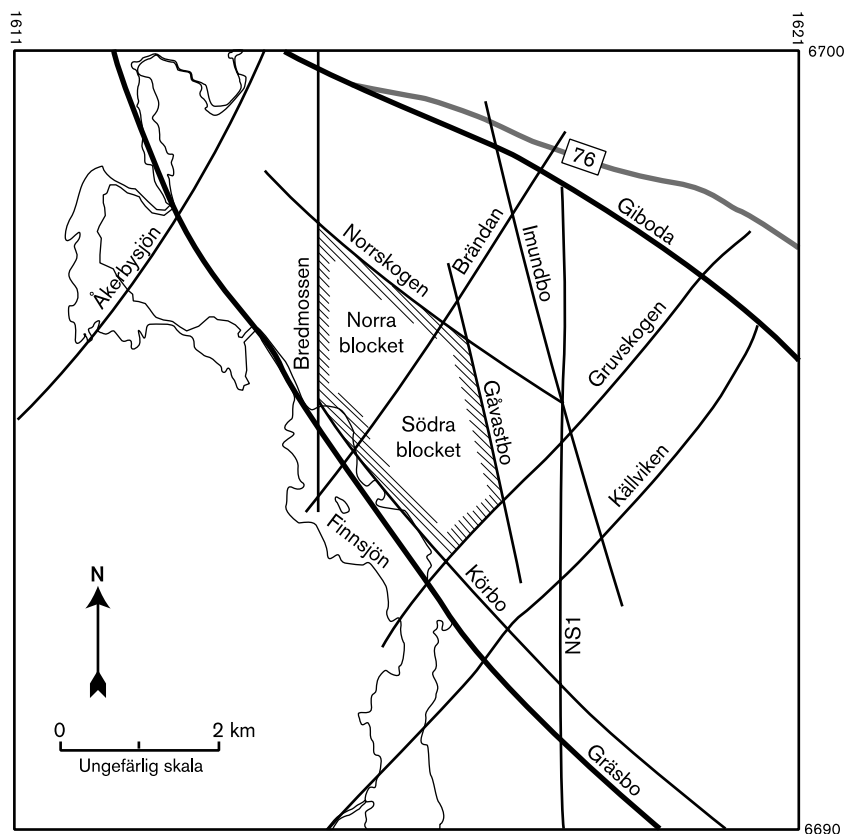
I tabell 9-2 avser beteckningen SRD (site-scale rock domain) domäner i horisontalplanet, se figur 9-13 och figur 9-14. Aberg och Beberg har olika medelkonduktivitetvärden i horisontalplanet. Ceberg däremot har samma medelkonduktivitet i hela horisontalplanet men ett djupberoende i flera diskreta steg.

Som framgår av tabell 9-2 är konduktivitetvärdena för bergmassan på försvarsdjup i Ceberg mer än två storleksordningar lägre än motsvarande värden för Aberg och Beberg. För Ceberg är också skillnaden i konduktivitetvärden mellan bergmassa och sprickzoner minst.

Sprickzonernas konduktivitetvärden är sammanfattade i avsnitt 6.5 och beskrivna i större detalj i Försvarssystemrapporten. Mindre anpassningar av data till HYDRASTAR-modellens parametrering har gjorts, se respektive underlagsrapport.



Figur 9-13. Aberg domäner för bergmassa i HYDRASTAR.



Figur 9-14. Beberg domäner för bergmassa i HYDRASTAR.

Förvarsutformningarna för de tre platserna finns beskrivna i detalj i Munier m fl /1997/ och baseras på principen att förvaret bör undvika sprickzoner. De igenfyllda tunnarna antas ha en hydraulisk konduktivitet av 10^{-10} m/s medan den störda zonen är försummad. Med de valda elementstorlekarna (25 respektive 35 meter) är effekten av denna approximation försumbar. Den störda zonen inkluderas dock i analysen av närzonsflöden, se avsnitt 9.9.4. De enskilda deponeringshålerna modelleras inte i HYDRASTAR. Drygt etthundra representativa kapselpositioner utspridda över varje förvarsområde används vid beräkning av gångtider från förvarsdjup till biosfär samt vid beräkning av specifika flöden.

Det hypotetiska förvaret för Aberg är lagt i två våningar på nivåerna -500 och -600 meter över havet. I Beberg är hela förvaret inlagt på -600 meter över havet och i Ceberg på -500 meter över havet.

Randvillkoren för lokalmodellerna fås från de regionala modellberäkningarna som beskrevs i avsnitt 8.7.2. Eftersom lokalmodellerna inte hanterar densitetsdriven strömning har specialfall utan saltvatten använts för att beräkna randvillkoren i regionalmodellerna för Aberg och Beberg. Randvillkoren från regionalmodellerna förs över som tryckhöjd (hydraulic head) på lokalmodellernas sex sidor.

9.8.3 Aberg basfall och varianter

För Aberg har ett basfall enligt modellapplikationen ovan samt fem varianter studerats:

1. Alternativa randvillkor.
2. Uppskalning av hydraulisk konduktivitet.
3. Anisotropi i statistisk beskrivning av hydraulisk konduktivitet.
4. Hydraulisk konduktivitet betingad på mätdata.
5. Deterministisk simulering med konstant hydraulisk konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

Varianterna har valts av en grupp experter för att belysa frågor kring modellapplikation och egenskaper hos systemet.

Den första varianten belyser hur variationer i regionalmodellen påverkar randvillkoren till lokalmodellen. Bl a har regionalberäkningar med stokastisk konduktivitet samt med eller utan densitetsdriven strömning analyserats. Eftersom HYDRASTAR inte kan hantera densitetsdriven strömning är det av intresse att försöka efterlikna denna effekt genom att använda densitetskompenserad tryckhöjd (environmental head) som randvillkor från den regionala modellen som inkluderar densitetsdriven strömning. En densitetskompenserad tryckhöjd som randvillkor approximerar väl system där densitetsgradienten är nästan vertikal /Follin, 1999; Lusczynski, 1961/ som vid t ex Aberg. Förenklade hydrostatiska tryckrandvillkor analyseras också. För variant 1 har endast en realisering för varje behandlat fall beräknats. Variant 1.2 i figur 9-15 representerar fallet med en regionalmodell med stokastisk konduktivitet och randvillkor som förs över som densitetskompenserad tryckhöjd.

Den andra varianten belyser huruvida resultaten är känsliga för den diskretiseringskala till vilken de uppmätta konduktiviteterna skalas om. I stället för 25 meter har 50 meter diskretiseringskala använts i variant 2.

Det finns indikationer från Aberg att den hydrauliska konduktiviteten är anisotrop /t ex Rhén m fl, 1997/, dvs att konduktivitetens värdena i olika riktningar vid samma läge har olika magnitud. Även om HYDRASTAR inte kan simulera denna effekt kan beteendet delvis approximeras av en modell med stokastisk anisotropi i hydraulisk konduktivitet /Bergman och Walker, 1998/. Stokastisk anisotropi innebär att korrelationslängderna (se tabell 9-2) är olika i olika riktningar. Denna variant analyserar effekterna av en ökad korrelationslängd med en faktor två (variant 3.1) respektive tio (variant 3.2) i nordvästlig riktning.

Variant 4 belyser en alternativ modellbeskrivning av heterogeniteten. I basfallet är beräkningsmodellen uppdelad i domäner för bergmassa och sprickzoner med given statistik. I variant 4 består beräkningsmodellen av endast en domän med en geometrisk medelkonduktivitet av $2 \cdot 10^{-8}$ m/s. Varians och korrelationslängd (practical range) av $\log_{10}K$ är 3,1 respektive 122 meter. De enskilda konduktivitetens värdena har betingats mot uppmätta fältvärden. Vid betingningen antar de modellerade konduktivitetens värdena de uppmätta värdena i mätpunkterna. Korrelationsstrukturen bestämmer influensen av de uppmätta värdena på intilliggande simulerade värden. Med tillräckligt många uppmätta värden och en förhållandevis lång korrelationslängd kan den geologiska strukturen återskapas i modellen.

I variant 5 ansätts inte någon variabilitet i hydraulisk konduktivitet för vare sig bergmassa eller sprickzoner, dvs de hydrauliska konduktiviteterna är deterministiska. Syftet är att studera effekten av utebliven rumslig variabilitet kontra de explicit definierade strukturerna, samt att studera uppskalningsmetodik. Genom att jämföra det totala flödet över modellränderna i variant 5 och basfallet fås en indikation på uppskalningsmetodikens konsistens.

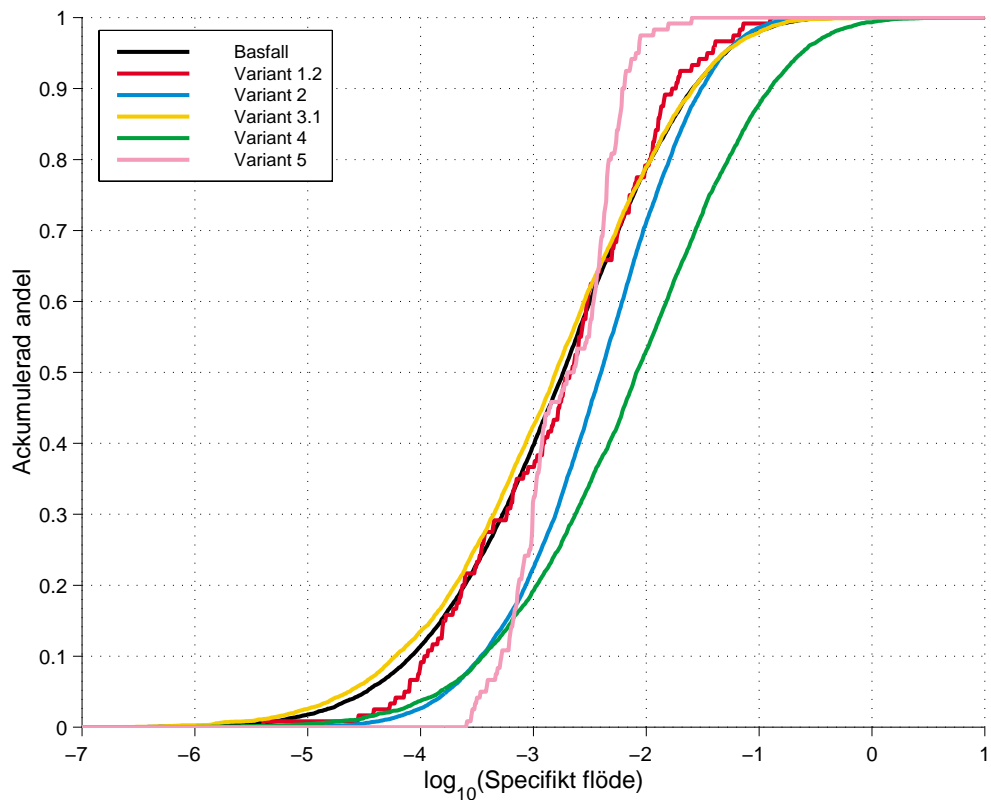
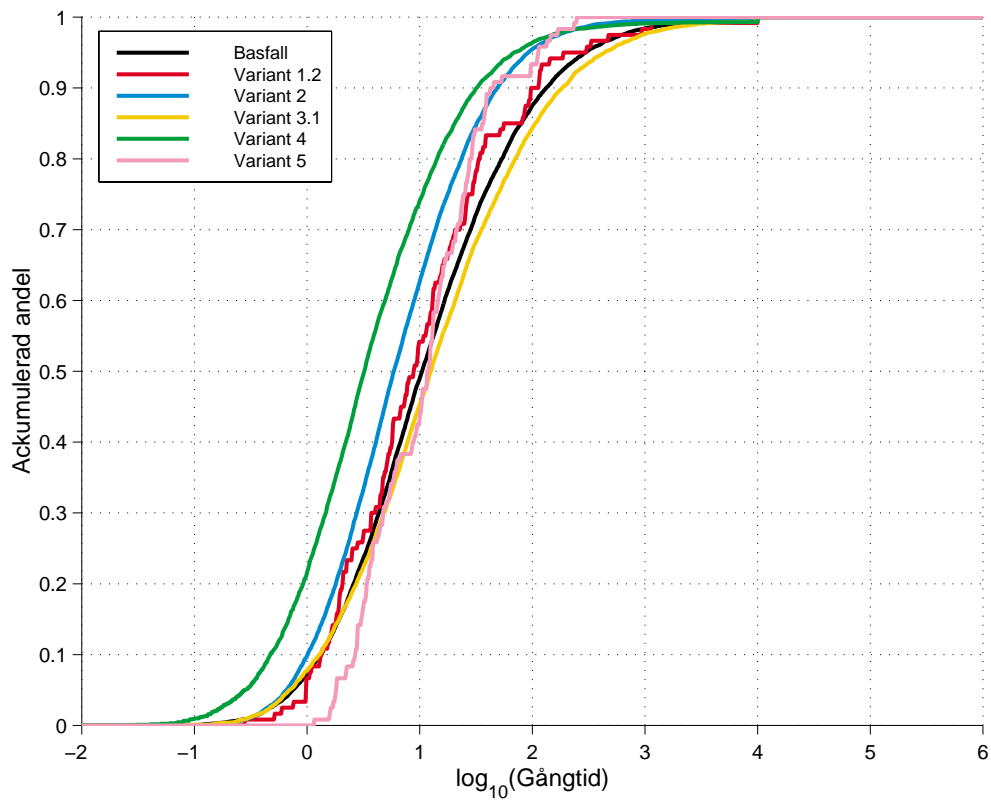
I figur 9-15 visas resultaten för gångtider och specifika flöden för basfall och varianter. Resultaten representerar ensemblestatistik över samtliga realiseringar och kapselpositioner. För variant 1 är enbart fallet med randvillkor som förs över som densitetskompenenserad tryckhöjd från en regionalmodell med stokastisk konduktivitet presenterat (variant 1.2). Variant 3.2 finns inte heller med i figuren men är mycket likt variant 3.1.

Figur 9-15 visar att basfall och varianter i stort är snarlika både vad gäller fördelningarnas läge och spridning. I variant 5 (deterministiska hydrauliska konduktiviteter) är spridningen dock väsentligen mindre eftersom den rumsliga variabiliteten i hydraulisk konduktivitet är försummad förutom den storskaliga variationen som ges av indelningen i olika domäner för bergmassa och sprickzoner. Variant 1.2 (alternativa randvillkor) som baseras på en enskild realisering resulterar också i mindre spridning än basfallet.

Resultaten i variant 1 indikerar att effekten av salinitet, inkluderad genom den densitetskompenenserade tryckhöjden, endast marginellt påverkar gångtider, specifika flöden och andel partiklar som når ytan. Numeriska studier av Aberg som fullt ut hanterar densitetsdriven strömning /Svensson, 1997a; 1997b/ påvisar större effekter av försummat densitetsberoende. För specifikt flöde predikteras drygt en storleksordning högre värden i HYDRASTARs basfall än i modellen av Svensson /1997b/.

Vad gäller transport från en enskild kapsel representerar fördelningarna i figur 9-15 den osäkerhet i gångtid som den naturliga variabiliteten kombinerat med den slumpmässiga kapselpositionen innebär. Figuren visar att denna osäkerhet är betydligt större än den osäkerhet som de olika varianterna representerar. Den övergripande slutsatsen av dessa jämförelser är alltså att effekter av den rumsliga variabiliteten dominerar över de osäkerheter som beror på gjorda antaganden om egenskaper hos systemet.

Analys av enskilda kapselpositioner ger smalare fördelningar, se Walker och Gylling /1998/. Detta indikerar att en del av den variationsbredd som ses i figur 9-15 beror på skillnader mellan olika startpositioner. Analysen av enskilda kapselpositioner visar också att olika kapselpositioner inom förvaret har systematiskt olika medelgångtider och specifika flöden. Denna typ av information skulle kunna användas för att i viss mån optimera förvaret genom att undvika ogynnsamma positioner. Som nämnt har detta inte gjorts inom SR 97. Vid denna typ av optimering är HYDRASTARs diskretisering med element på skalan 25–30 meter en begränsning. Enskilda strukturer på skalor mindre än diskretiseringsskalan upplöses inte i modellen, och därför kan inplacering av kapslar inte göras med större noggrannhet än denna skala.



Figur 9-15. Jämförelse av a) gångtider (år) och b) specifikt flöde [$m^3/(m^2 \cdot \text{år})$] på förvarsdjup mellan basfall och varianter. Simuleringen av gångtider avbröts vid 10 000 år.

För att jämföra beräkningsresultatet med observerade förhållanden vid Aberg kan den advektiva gångtiden uppskattas som:

$$t_w = \frac{L \varepsilon_f}{Ki}$$

där

$L = 500$ m är partikelbanans längd,
 $\varepsilon_f = 10^{-4}$ är flödesporositet,
 $K = 10^{-7}$ m/s är hydraulisk konduktivitet samt
 $i = 10^{-3}$ är hydraulisk gradient.

Överslaget ger en gångtid av $t_w = 16$ år. Storleksordningen stämmer väl med resultaten från HYDRASTAR. Konduktivitetetsvärdet representerar sprickzoner vid Aberg, gradienten gäller på förvarsdjup vid Aberg (avsnitt 8.7.2). Uppskattningen av flödesporositet är mycket osäker och har pessimistiskt satts till 10^{-4} , både i överslagsberäkningen ovan och i modellberäkningarna. En mer realistisk porositet av 10^{-3} skulle ge tio gånger längre gångtider. Osäkerheten i flödesporositet kan därmed ha större inverkan på resultatet än de antaganden som görs i de olika varianterna.

Som nämnts ovan ger gångtiderna ensamma inte all nödvändig information för att erhålla uppehållstiden för lösta ämnen i geosfären. I avsnitt 9.9.7 visas hur även sådana tider kan beräknas överslagsmässigt, och att de korta gångtiderna vid Aberg inte står i konflikt med observationer av mycket gammalt vatten på förvarsdjup. De korta gångtiderna vid Aberg är bl a ett resultat av det uppåtriktade strömningsmönstret som ger korta partikelbanor.

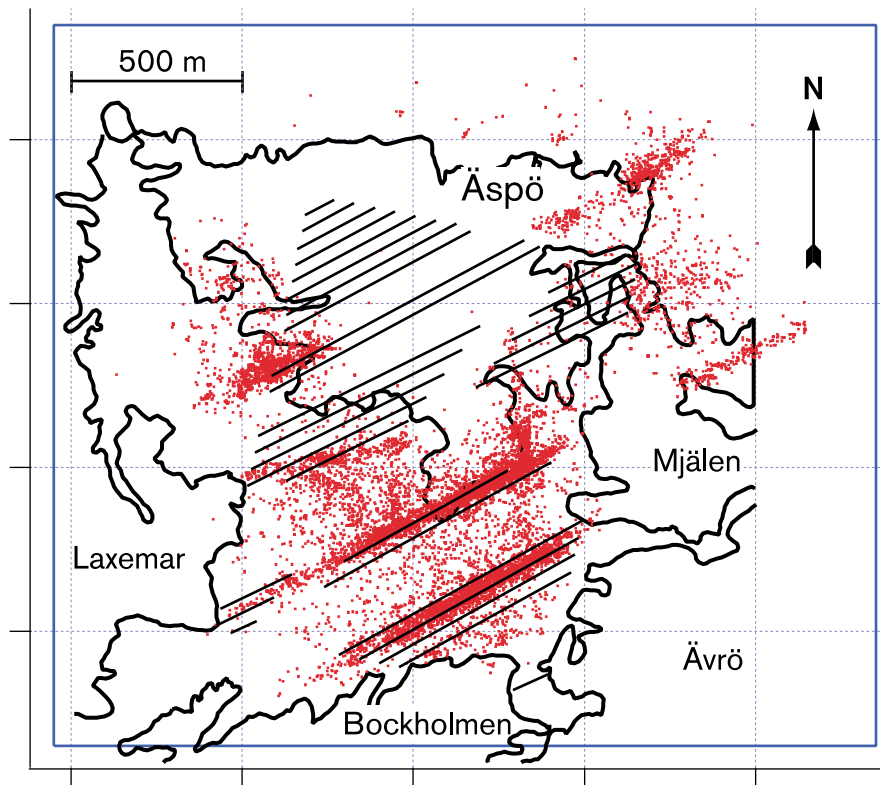
Utsläppspunkterna på den övre modellranden för basfallet visas i figur 9-16. Utsläppspunkter för samtliga kapselpositioner och realiseringar är indikerade i figuren. Sprickzonerna tenderar att koncentrera utsläppspunkternas läge.

9.8.4 Konceptuell osäkerhet vid Aberg

Ett speciellt projekt, Alternativa Modellprojektet (AMP), har genomförts för att analysera konceptuell modellosäkerhet. Aberg har modellerats med den stokastiska kontinuummodellen HYDRASTAR /Widén och Walker, 1999/, den diskreta spricknätverksmodellen FracMan/MAFIC/PAWorks /Dershowitz m fl, 1999/, samt med kanalnätverksmodellen CHAN3D /Gylling m fl, 1999b/.

I AMP har strikta modelleringsförutsättningar gällt för att resultaten ska bli jämförbara. Jämfört med HYDRASTAR-simuleringarna ovan är den viktigaste skillnaden att enbart en del av förvaret har tagits med i AMP-modellerna. I AMP har jämförelser mellan gångtider, specifika flöden och F-faktorer gjorts. Gångtider och specifika flöden diskuteras nedan; F-faktorn, som starkt påverkar retentionen vid radionuklidtransport, diskuteras vidare i avsnitt 9.9.7.

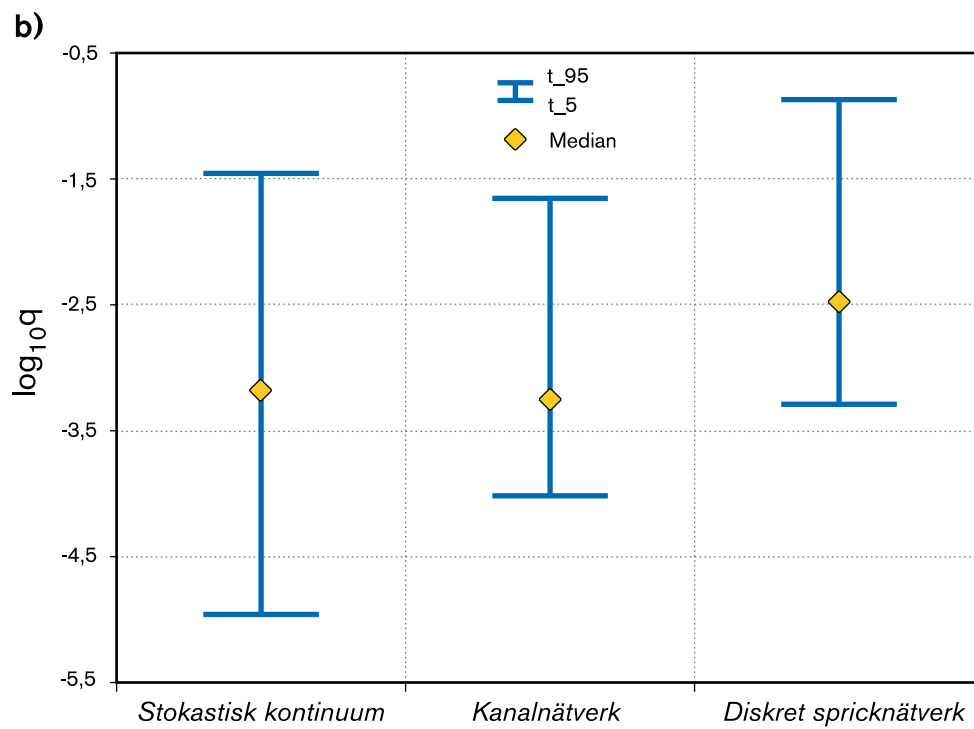
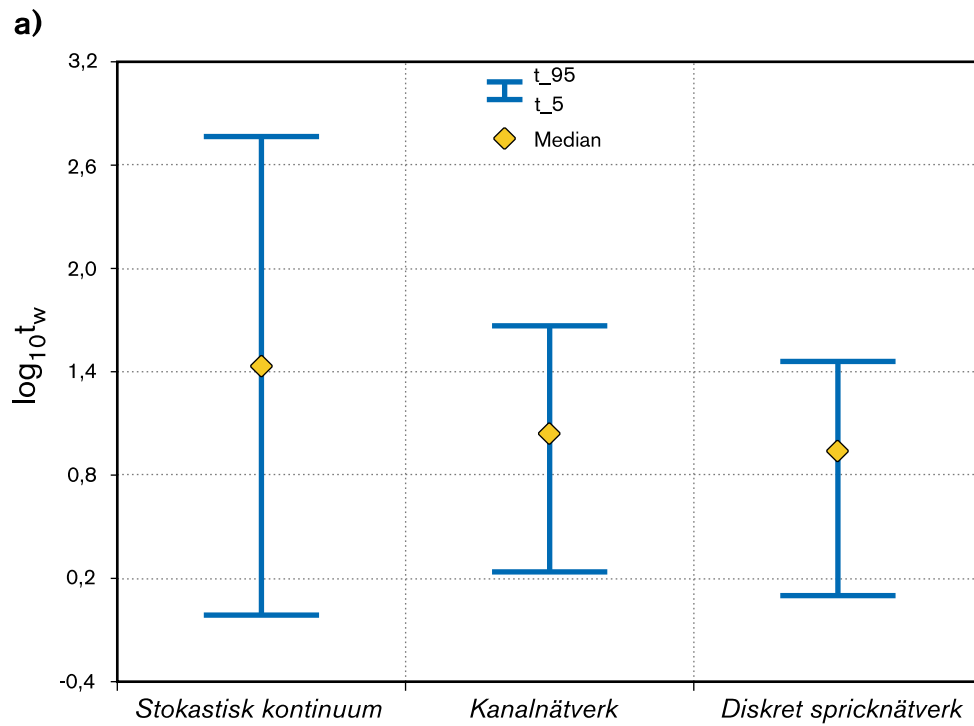
Analysen visar att samtliga modeller ger konsistenta gångtider och specifika flöden på förvarsdjup, se figur 9-17. Speciellt resultaten för median av gångtid och median av specifikt flöde är mycket lika. Spridningen är dock större i HYDRASTAR än i de två andra modellerna. För FracMans del kan detta förklaras med att resultaten endast representerar en del av förvaret jämfört med förvaret i de två andra modellerna.



Figur 9-16. Utsläppspunkter för Aberg's basfall. Förvarstunmlar på -500 meter över havet visas projicerade på ytan.

Dessutom är endast cirka 40 procent av kapselpositionerna i FracMan förbundna med vattenförande sprickor. Slutligen har endast ett mindre antal realiseringar gjorts vilket kan påverka statistikens tillförlitlighet. För CHAN3D:s del kan den mindre spridningen i gångtider bero på att gångtiden från varje kapselposition representeras av medianvärdet av ett flertal partiklar som släppts i den aktuella punkten, se vidare Gylling m fl /1999b/. Även om spridningen är större i HYDRASTAR än i FracMan och CHAN3D predikterar modellerna värden av snarlik magnitud för de kortaste gångtiderna och högsta flödena.

Även utsläppspunkterna predikteras snarlikt i de tre modellerna. Detta sammantaget indikerar att problemförutsättningarna snarare än den valda modellen styr resultatet, dvs att den konceptuella osäkerheten är låg. Vidare kan konstateras att HYDRASTARs basfall och varianter i figur 9-15 i stort täcker in hela variationsbredden av resultat beräknade med de olika modellerna i det alternativa modellprojektet.



Figur 9-17. Ensemble resultat för a) gångtider (år) och b) specifika flöden [$m^3/(m^2 \cdot \text{år})$] på förvarsdjup i AMP modellerna. Resultat för 5 percentil, median och 95 percentil.

9.8.5 Beberg basfall och varianter

För Beberg har ett basfall enligt modellapplikationen ovan och fyra varianter som belyser olika antaganden analyserats:

1. Randvillkor från en regionalmodell inkluderande salinitet.
2. Alternativa konduktiva strukturer.
3. Alternativ hydrogeologisk tolkning.
4. Deterministisk simulering med konstant hydraulisk konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

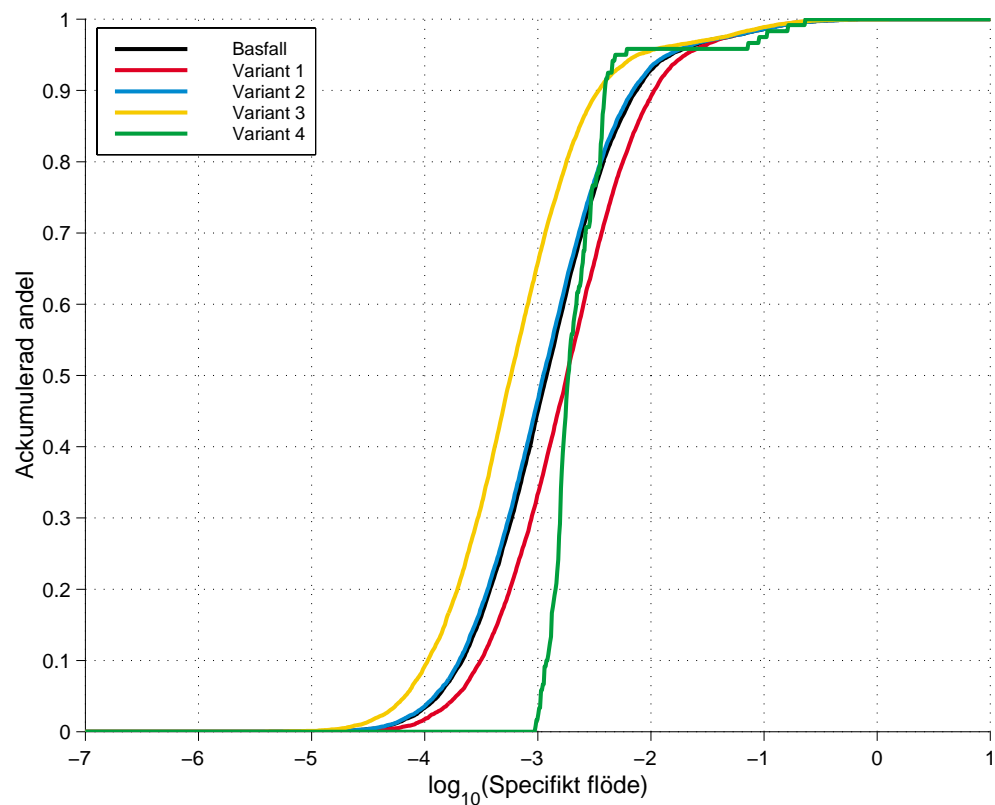
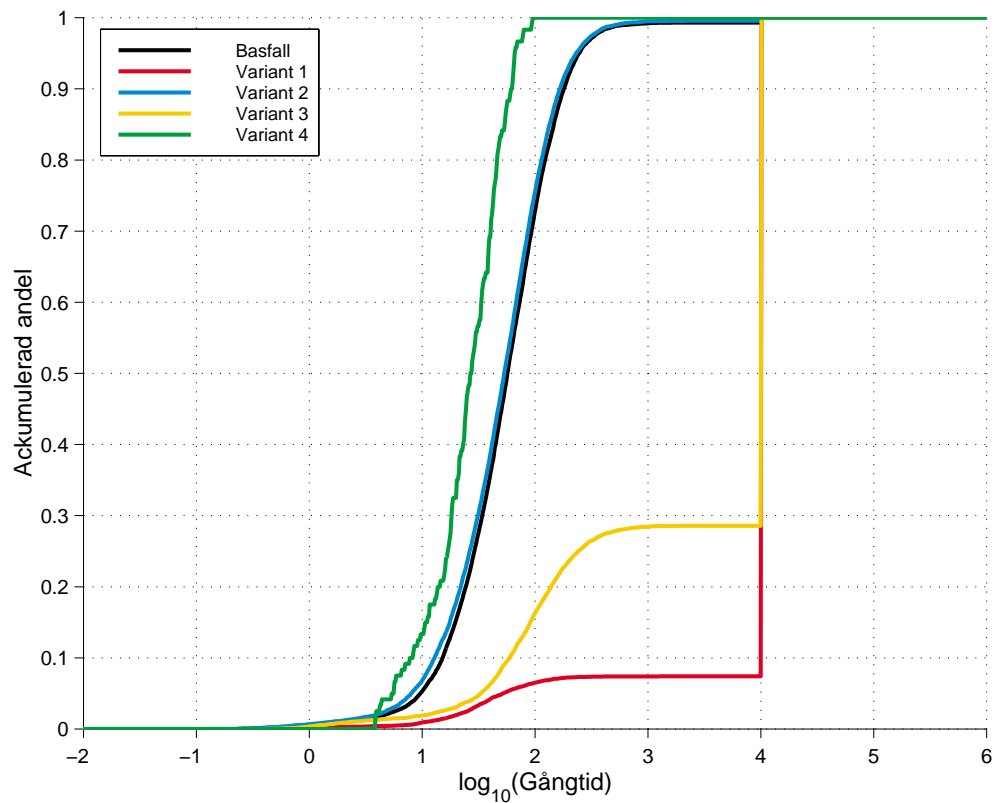
I den regionala modellen konstaterade Hartley m fl /1998/ att strömningsmönstret vid förvaret var nedåtriktat på grund av transienta saltvatteneffekter. Detta gav långa gångtider från förvarsdjup till modellränder med tider på hundratals år för vissa partiklar. I variant 1 översätts förhållanden från en regional modell med salinitet till densitetskompenserad tryckhöjd (environmental head) för användning som randvillkor i HYDRASTAR.

I en separat studie inom SR 97 har Saksa och Nummela /1998/ gjort bedömningar av de använda strukturmodellerna. För Beberg konstaterades att vissa ytterligare zoner kan finnas som inte inkluderats i den ursprungliga strukturmodellen som används i basfallet. Dessa strukturer inkluderas som sprickzoner i variant 2. Dessutom inkluderas tre zoner från den ursprungliga strukturmodellen som inte inkluderades i basfallet för att deras utvärderade konduktiviteter är lägre än den omgivande bergmassans. Samtliga nya zoner i variant 2 antas ha en hydraulisk konduktivitet lika med medelvärdet av de tidigare använda zonerna i basfallet.

I regionalmodellen undersökte Hartley m fl /1998/ även en alternativ hydrogeologisk tolkning av Beberg. Den alternativa modellen undersöks i lokal skala i variant 3. Skillnaderna jämfört med basfallet är att zon 2 betraktas som en tredelad konduktiv struktur med en lågpermeabel kärna, fem övriga strukturer avslutas under zon två, samt att ett annat djupberoende för bergmassans konduktivitet används. Även i denna variant används densitetskompenserad tryckhöjd som randvillkor.

Variation 4 är en deterministisk variant, dvs utebliven variabilitet i hydraulisk konduktivitet för både bergmassa och sprickzoner har antagits. Syftet är att undersöka effekten av utebliven rumslig variabilitet kontra de explicit definierade strukturerna, samt att studera uppskalningsmetodiken.

I figur 9-18 visas resultaten för gångtider och specifika flöden för basfall och samtliga varianter. De presenterade resultaten representerar ensemblestatistik över samtliga realiseringar och kapselpositioner.



Figur 9-18. Jämförelse av a) gångtider (år) och b) specifikt flöde [$m^3/(m^2 \cdot \text{år})$] på förvarsdjup för basfall och varianter vid Beberg. Simuleringen för gångtider har avbrutits vid 10 000 år.

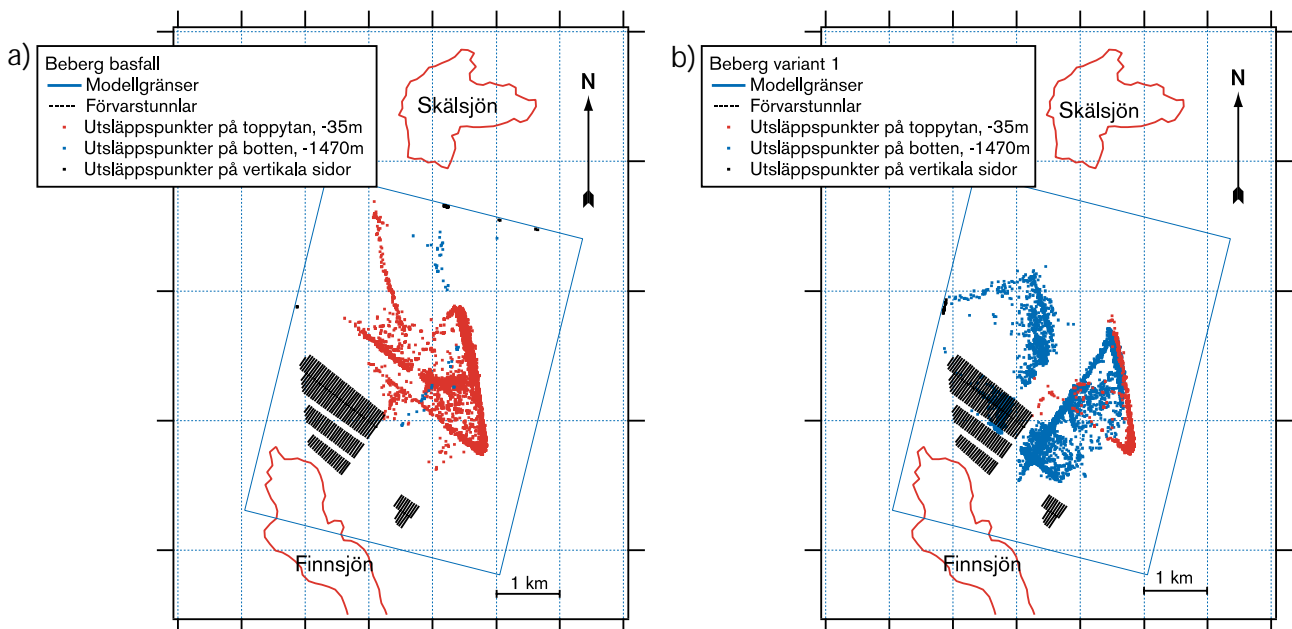
Figur 9-18a visar att andelen partiklar som når ytan i variant 1 och 3 är betydligt lägre än motsvarande andel i basfallet och variant 2. De partiklar som når den övre ytan i varianterna med huvudsakligen nedåtriktad strömning har dock gångtider av samma storleksordning som övriga varianter. Figur 9-18 indikerar även att spridningen i gångtid inom de olika varianterna och basfallet är jämförbara då partiklarna som inte når ytan i variant 1 och 3 försummas.

Jämförelsen av specifika flöden i figur 9-18 visar att samtliga varianter är snarlika. Dock har variant 4 (deterministiska hydrauliska konduktiviteter) som förväntat betydligt mindre spridning i flödesvärden. Figur 9-18 indikerar också att basfallet och variant 2 (ytterligare zoner) är nästan identiska både vad gäller gångtider och specifika flöden. Vissa skillnader i partikelbanor uppstår dock på grund av de tillagda zonerna.

I ett separat arbete har NAMMU använts för att studera effekterna av densitetsdriven strömning vid Beberg /Marsic och Hartley, 1999/. Vid simuleringen har ett konduktivitetsfält motsvarande Variant 4 för HYDRASTAR använts. Resultaten indikerar vid jämförelse med motsvarande resultat från HYDRASTAR att användandet av en densitetskompenserad tryckhöjd som randvillkor kan appliceras vid Beberg för att representera effekterna av densitetsdriven strömning.

Basfallets resultat i figur 9-18 är jämförbara med motsvarande resultat från SKB 91 /SKB, 1992/. Gångtiderna i SR 97 är något kortare på grund av i första hand de något högre konduktivitetsvärden som använts i SR 97. I SKB 91 delades berget inte in i olika domäner för bergmassa, dessutom användes andra uppskalningsförfaranden och djupberoende för den hydrauliska konduktiviteten.

Figur 9-19 visar utströmningsområden för basfallet och för variant 1.



Figur 9-19. Utsläppspunkter för Bebergs a) basfall och b) variant 1. Förvarstunnlar på -600 meter över havet visas projicerade på ytan.

För basfallet styrs utsläppspunkternas läge av de regionala strukturerna samt gradienten mot nordost. I variant 1 tillkommer effekten av den nedåtriktade strömningen som resulterar i en stor andel utsläppspunkter på modellens undre rand.

9.8.6 Ceberg basfall och varianter

Också för Ceberg har utöver ett basfall ett antal varianter analyserats:

1. Kontrast i hydraulisk konduktivitet mellan domäner för bergmassa och sprickzoner ökad med en faktor 100.
2. Alternativa konduktiva strukturer.
3. Ökad varians i hydraulisk konduktivitet.
4. Deterministisk simulering med konstant hydraulisk konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

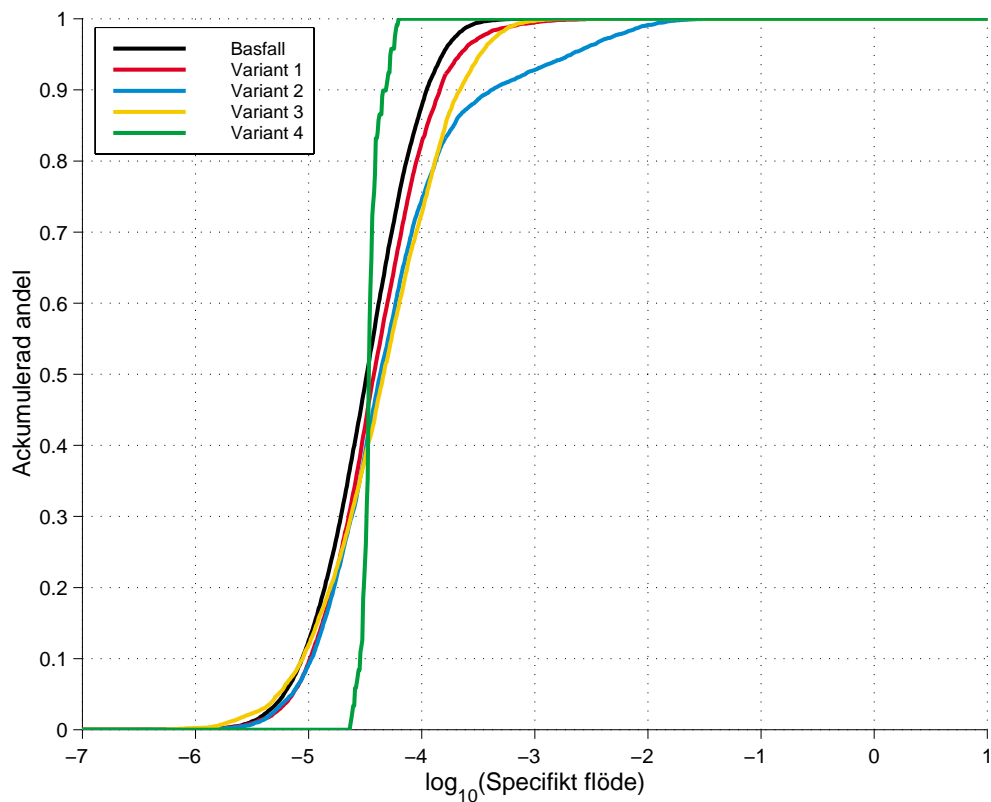
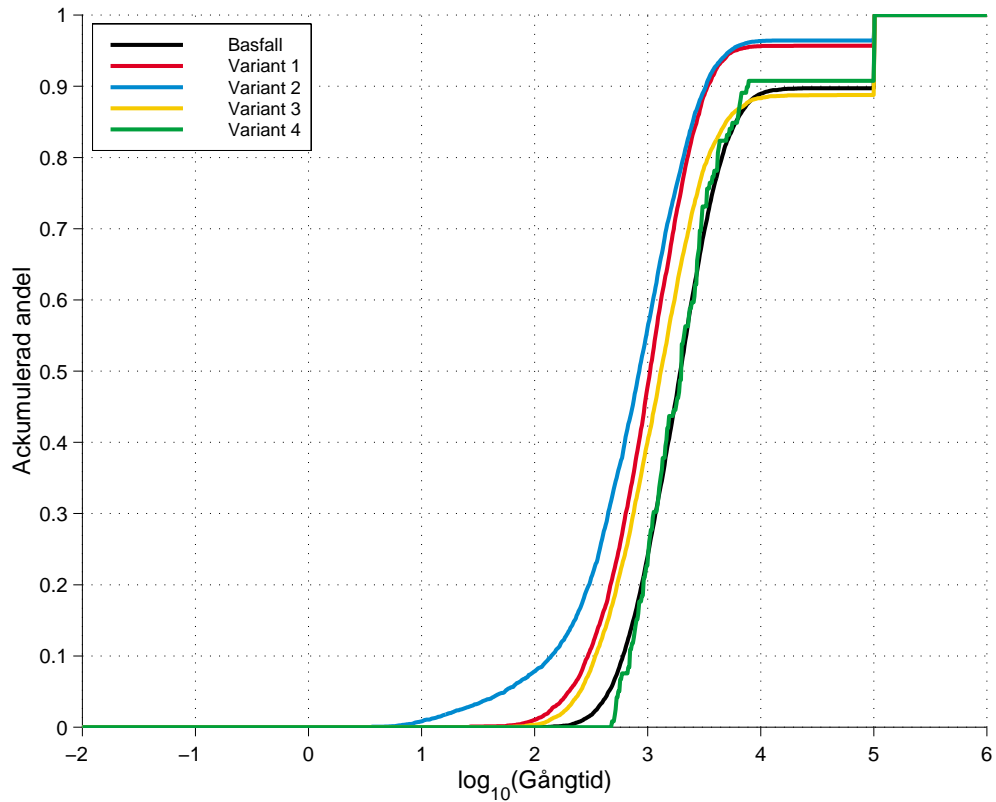
I basfallet är skillnaden i konduktivitet mellan bergmassa och sprickzoner liten. På grund av en begränsad datamängd föreslås i Walker m fl /1997/ att samtliga sprickzoner modelleras med identiska hydrauliska egenskaper. Analys av enskilda zoner indikerar dock att högre konduktiviteter är möjliga för vissa sprickzoner /Walker m fl, 1997/. Den första varianten belyser effekterna av en hundrafaldig ökning i hydraulisk konduktivitet för samtliga sprickzoner.

Den andra varianten belyser effekten av alternativa konduktiva strukturer. Det antas att alla sprickzoner, gångbergarter samt topografiska lineament är högkonduktiva zoner. Liksom för variant 1 har det antagits att kontrasten mellan domänerna för bergmassa och sprickzoner är ökad med en faktor hundra jämfört med basfallet. Det geografiska läget för dessa ytterligare sprickzoner är hämtade från Saksa och Nummela /1998/ som utvärderat osäkerheter i geologiska strukturmodeller för samtliga tre platser.

Nuvarande version av HYDRASTAR har en begränsning i att samma varians för hydraulisk konduktivitet måste specificeras både för bergmassa och sprickzoner. Den använda variansen för basfallet baseras på data för bergmassa som är mer omfattande samt anses mer tillförlitlig. Skulle man använda data för sprickzoner skulle variansen dock öka betydligt. Variant 3 belyser detta fall med en varians för hydraulisk konduktivitet (\log_{10} skala) ökad till 2,0. Det bör poängteras att detta är ett rent hypotetiskt fall i och med att variansen även för bergmassa ökas; det finns inte stöd i data för en sådan ökning.

Den sista varianten är deterministisk, dvs utebliven variabilitet i hydraulisk konduktivitet för både bergmassa och sprickzoner har antagits. Syftet med denna variant är att studera effekten av utebliven rumslig variabilitet kontra de explicit definierade strukturerna, samt att närmare studera uppskalningsmetodiken.

I figur 9-20 visas resultaten för gångtider och specifika flöden för basfall och varianter. Resultaten representerar ensemblestatistik över samtliga realiseringar och kapselpositioner.

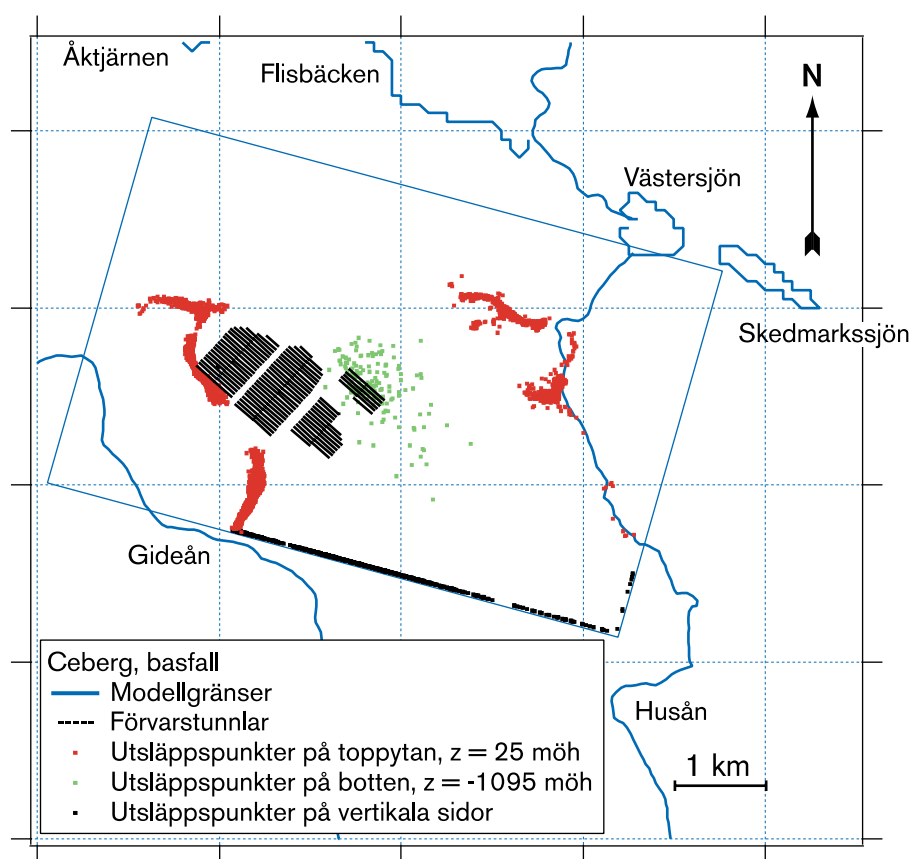


Figur 9-20. Jämförelse av a) gångtider (år) och b) specifikt flöde [$m^3/(m^2 \cdot \text{år})$] på förvarsdjup för basfall och varianter vid Ceberg. Simuleringen för gångtider har avbrutits vid 100 000 år.

Figur 9-20 indikerar att basfallet inte täcker upp samtliga varianter lika väl som vid Aberg och Beberg. Detta gäller speciellt gångtiderna där samtliga varianter utom variant 4 (deterministiska hydrauliska konduktiviteter) har kortare gångtider än basfallet. Variant 2 (alternativa konduktiva strukturer) är extrem i detta avseende med en högre andel mycket korta gångtider. Skillnaderna mellan varianterna är dock fortfarande mindre än skillnaden inom basfall och inom enskilda varianter.

Variant 4 (deterministiska hydrauliska konduktiviteter) och basfallet är snarlika vad gäller gångtider medan däremot spridningen i specifikt flöde är betydligt mindre i variant 4 än i basfallet. Detta indikerar att även om variabiliteten i domänen för bergmassa i basfallet ger större spridning av specifika flöden än i det deterministiska fallet, så är det främst skillnader i kapselpositionernas läge som styr spridningen av gångtider.

Utsläppspunkter för basfallets samtliga kapselpositioner och realiseringar visas i figur 9-21. Utsläppspunkterna är separerade i fyra distinkta områden. Två områden, i väster och i öster vid Husån, innehåller partiklar som når ytan. Området vid södra randen innehåller både partiklar som når ytan och partiklar som går ut genom den södra randen. Området i modellens mitt innehåller partiklar som går ut genom den undre randen, alltså i modellens botten. Dessa partiklar återspeglar ett regionalt, nedåtriktat strömningsmönster. Totalt når ungefär 90 procent av partiklarna ytan.



Figur 9-21. Utsläppspunkter för basfallet i Ceberg. Förvarstunnlar på -500 meter över havet visas projicerade på ytan.

9.8.7 Jämförelse mellan platserna

I figur 9-22 jämförs gångtider och specifika flöden i basfallen för de tre platserna. Aberg har kortast medelgångtid men störst spridning i fördelningen. Därefter följer Beberg och Ceberg som har längst medelgångtid och minst spridning då partiklarna som inte når ytan försummas.

För specifikt flöde har Aberg och Beberg medelvärden av samma storleksordning medan Ceberg ligger ungefär två storleksordningar lägre. Även här har Aberg störst spridning medan Ceberg har minst.

När resultaten i figur 9-22 jämförs bör man komma ihåg att basfallen för Aberg och Ceberg representerar dagens förväntade förhållanden medan Bebergs basfall är en hypotetisk situation som kan representera möjliga framtida förhållanden då sött vatten ersatt dagens salta vatten. Återigen poängteras att gångtiderna inte motsvarar grundvattnets verkliga uppehållstid, se diskussion i avsnitt 9.9.7.

En jämförelse av det totala flödet genom modellerna för basfallen och de deterministiska varianterna indikerar att uppskalningsförfarandet för den hydrauliska konduktivitetens medelvärde och varians kvalitativt fungerar för samtliga tre platser. Genom en jämförelse med motsvarande flöden i regionalmodellerna framgår att även överföringen av randvillkor från regionalmodell till lokalmodell fungerar acceptabelt för analysens syfte.

9.8.8 Osäkerheter

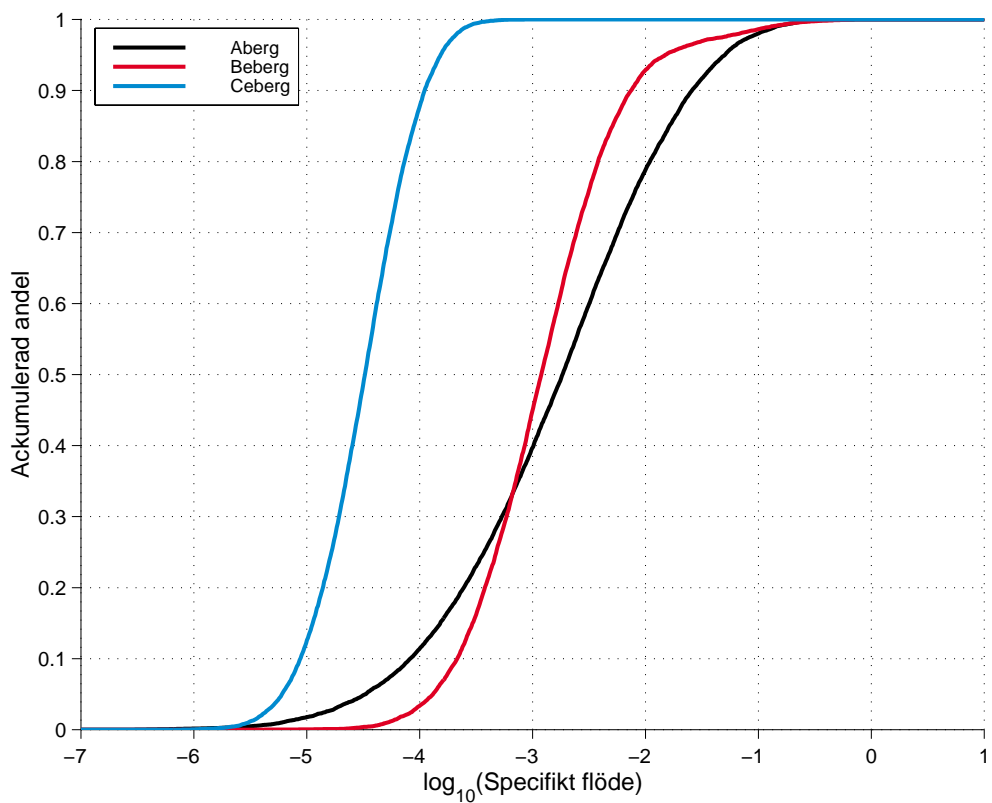
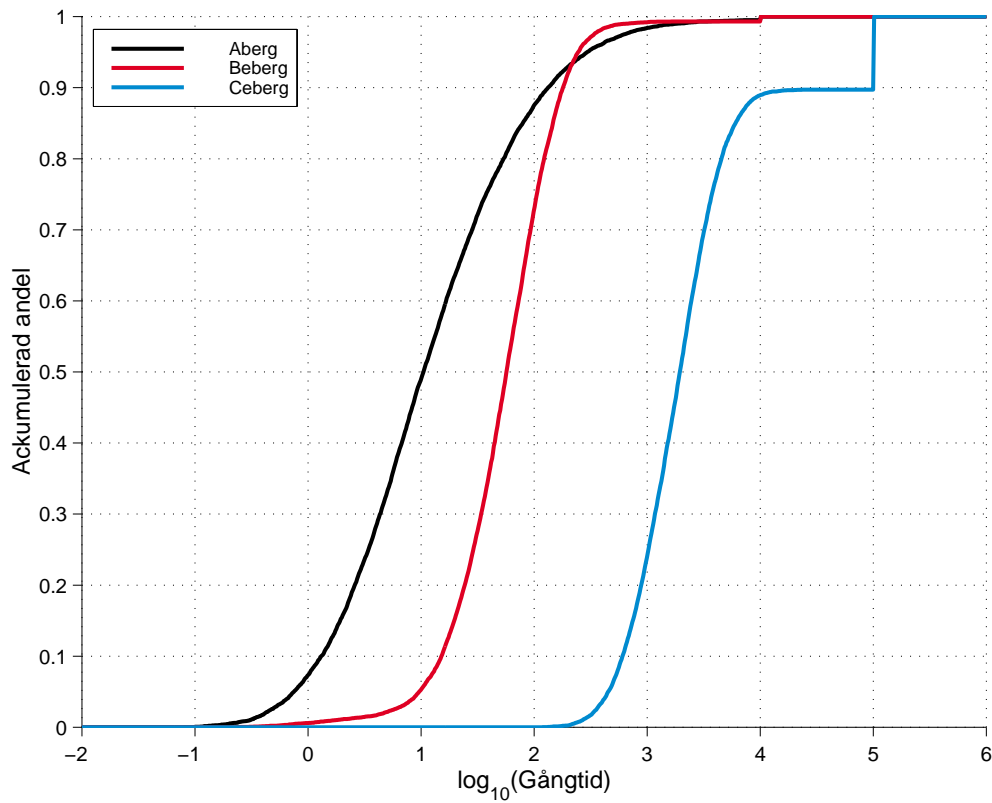
Lokalmodellernas syfte är att ge en förståelse av den hydrauliska situationen vid den aktuella platsen. Modellerna är behäftade med olika typer av osäkerheter. Man kan skilja mellan osäkerheter betingade av:

- det valda modellkonceptet,
- rumslig variabilitet, samt
- ofullständiga data om platsens geologiska strukturer och ofullständig kunskap om andra styrande egenskaper.

I Datarapporten ges en mer utförlig beskrivning av samtliga osäkerheter kopplade till beskrivningen av grundvattenflöde.

Betydelsen av **konceptuell osäkerhet** analyseras i första hand för Aberg. Tre olika modeller för grundvattenflöde och advektiv transport används för att analysera hur valet av modellkoncept för beskrivning av bergets hydrogeologiska egenskaper påverkar resultatet. De olika modellkoncepten ger snarlika resultat.

Den rumsliga variabiliteten innebär att bergets egenskaper endast är kända i en statistisk mening; vi känner inte bergets egenskaper i varje punkt. Den resulterande osäkerheten hanteras kvantitativt med multipla Monte Carlo-realiseringar, alla lika sannolika, av bergets egenskaper och resulterande grundvattenströmning. Resultaten uttrycks statistiskt med fördelningar. För samtliga platser visas att geosfärens heterogenitet i kombination med den slumpmässigt valda positionen för en skadad kapsel ger de största osäkerheterna i gångtider och specifika flöden.



Figur 9-22. Jämförelse av a) gångtider (år) och b) specifika flöden [$m^3/(m^2 \cdot \text{år})$] på förvarsdjup för basfallen i Aberg, Beberg och Ceberg.

Osäkerheter betingade av **ofullständiga data och kunskap om egenskaper hos systemet** analyseras genom att jämföra ett basfall med ett antal varianter. Basfallet representerar oftast den förväntade hydrauliska situationen medan varianterna belyser olika antaganden om egenskaper och alternativa tolkningar av underliggande data. Inom SR 97 har en grupp experter prioriterat en uppsättning varianter. Ytterligare motiv för de olika varianterna ges i respektive underlagsrapport. Resultaten visar att skillnaderna mellan olika varianter oftast är liten. Undantaget gäller salinitetseffekter som vid Beberg styr den dominerande strömningsriktningen.

Tidsvariationen på ränderna har försumrats i samtliga lokalmodeller. Modellerna beskriver dagens förhållanden; effekterna av landhöjning är försummade trots att detta förlopp ingår i kapseldefektsscenarioet. För Beberg beskrivs dock den transienta utvecklingen i den regionala skalan /Hartley m fl, 1998/ medan en kompletterande modellering i lokal skala för Aberg har inkluderat transienta effekter /Svensson, 1999/. Svenssons studie visar att de storheter som propageras till radionuklidberäkningar endast förändras marginellt av landhöjningen i jämförelse med effekter av övriga osäkerheter.

De beräknade skillnaderna i gångtider och specifika flöden mellan de olika platserna är konsistenta med de skillnader i hydrogeologiska förhållanden/data som presenteras i Walker m fl /1997/. Fastän faktorer som randvillkor och partikelbanornas längd påverkar resultaten kan den underliggande skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan platserna till viss del förklara resultaten. Detta gäller speciellt skillnaderna mellan Ceberg och de två övriga platserna; då Aberg och Beberg jämförs där konduktivitetsvärdena är mer snarlika är inverkan av gradient och utströmningsområdenas läge viktigare.

En intressant följdfråga är huruvida skillnaderna i modellresultat mellan platserna representerar verkliga fysikaliska skillnader i underliggande hydrogeologiska förhållanden, eller om de orsakas av skillnader i undersökningsmetodik (antal mätningar, mätteknik etc). En del av svaret antyds vid en jämförelse med resultaten av tidigare analyser. Även i KBS-3-projektet /SKBF/KBS, 1983/ analyserades Gideå (Ceberg) och Finnsjön (Beberg). Samma data som användes för Ceberg i KBS-3 har använts i SR 97, medan databasen för Beberg utökats mellan KBS-3 och SR 97. I KBS-3-projektet användes liknande undersökningsmetodik och utvärdering av samtliga platser. Liksom i SR 97 framkom i KBS-3 en beräknad skillnad i specifikt flöde på förvarsdjup på ungefär två storleksordningar då Beberg och Ceberg jämfördes. Detta indikerar att systematiska skillnader i undersökningsmetodik mellan platserna i SR 97 har underordnad betydelse för säkerhetsanalysens resultat. Man har dock inte i SR 97 fullt ut kunnat kvantifiera till hur stor del skillnaderna i beräknade resultat beror på faktiska, fysikaliska skillnader mellan platserna och till hur stor del på skillnader i undersökningsmetodik.

Tilltron till att HYDRASTAR är adekvat för sitt syfte i SR 97 diskuteras i avsnitt 9.11.3, tillsammans med andra centrala modeller för kvantifiering av radionuklidtransport. Diskussionen kring HYDRASTAR bygger till stor del på redovisningen av osäkerheter ovan.

9.9 Transportprocesser i förvaret

9.9.1 Överblick

De processer som kan leda till att radionuklider kan lösas upp i vattnet i en skadad kapsel har diskuterats i tidigare avsnitt. Vattenlösta radionuklider kan transporteras i kapselns inre, huvudsakligen genom diffusion och därigenom via skadan nå bufferten.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer, möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Varken advektion eller kolloidtransport förekommer på grund av buffertens egenskaper. Radionuklider kan sorberas till montmorillonitens ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering.

I berget kan radionuklider transporteras med det strömmande grundvattnet, advektion. Även diffusion kan vara betydelsefull under stagnanta förhållanden. En viktig aspekt av detta är matrisdiffusion dvs att radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och på så sätt undandras och transporteras långsammare än det flödande vattnet. Tidsskalan för advektion relativt tidsskalan för matrisdiffusion bestämmer den senare processens relativa betydelse. Av avgörande betydelse för radionuklidtransporten är även sorption, dvs det faktum att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa. Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsfenomenen. Vissa nuklider kan transporteras i gasfas.

Det radioaktiva sönderfallet slutligen påverkar innehållet av radionuklider i hela systemet och måste därför inkluderas i beskrivningen.

9.9.2 Transportprocesser i kapselns hålrum

Frigjorda radionuklider kan transporteras i kapselns inre och tränga ut genom ett skadat kopparhölje. Radionuklider som lösts i vatten inuti kapseln kan transporteras antingen genom att följa med i vattnets eventuella rörelser, advektion, eller genom att diffundera i vattnet. Transport i vatten är det dominerande transportsättet för radionuklider. Vissa nuklider kan förekomma i gasform i kapseln och kan då också transporteras i gasfas. Det gäller framförallt C-14, Rn-222 och Kr-85.

Transportvägarnas geometri i en skadad kapsel bestäms av kapselns och bränslets ursprungliga geometri samt av de förändringar korrosionen lett till. För att vatten ska komma i kontakt med bränsle och möjliggöra frigörelse och transport av radionuklider krävs genomgående skador hos såväl gjutjärnsinsats som zirkaloykapsling. Även om sådana skador uppkommit kan kvarvarande strukturer förväntas utgöra betydande transporthinder, både för inflöde av vatten och för uttransport av vattenlösta nuklider. Strukturen hos såväl de fyra meter långa kapslingsrören som bränslets övriga metalldelar, gjutjärnsinsatsen och kopparkapseln hindrar en effektiv transport. Även produkter från framförallt korrosionen av gjutjärnsinsatsen kan förväntas försvåra transport. Ytorna hos samtliga dessa strukturer kan också ha goda sorptionsegenskaper för vissa radionuklider.

Osäkerheterna kring framför allt vatten/gasomsättning i kapselns inre samt kring korrosion av gjutjärnsinsatsen och av bränslets metalldelar är stora. En bedömning av bl a de geometriska förhållandena och därmed transportvägarnas geometri blir därför

också osäker. Även sorptionsegenskaperna hos materialen i en skadad kapsel är svårbedömda.

Radionuklidtransport i kapselns inre förenklas därför pessimistiskt i säkerhetsanalysen på följande sätt: Efter att en bestämd skadad karensid förflutit sedan en skada på kapselns kopparhölje uppkommit antas hela kapselns inre tomrum vid förslutning, cirka 1 m³, vara fylld med vatten. Karensidens storlek bedöms med ledning av storleken på skadan i kopparhöljet och den påföljande vattenomsättningen och korrosionen (se avsnitt 9.6).

Allt vatten i kapseln antas efter karensiden vara tillgängligt för bränsleupplösningssprocessen, dvs stå i direkt kontakt med allt bränsle utan att hindras av zirkaloykapsling eller andra strukturer. Vattnet antas vara ständigt omrört, dvs inga koncentrationskillnader råder mellan olika delar i kapselns inre. Bränsleupplösningssprocessen (se 9.7) bestämmer därefter frigörelsetakten för matrisbundna radionuklider. Segregerade nuklider samt radionuklider i bränslets strukturdelar antas vara tillgängliga för vattenlösning omedelbart efter karensidens slut. Löslighetsbegränsade nuklider faller ut om koncentrationen i vattnet överstiger ämnets löslighet (se 9.7). Sorption av radionuklider till kapselns inre delar försummas.

Transport av radionuklider genom skadan i kopparhöljet modelleras som diffusion med antagande om skadans geometri.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

I och med modellantagandet om omrörd tank inne i kapseln behövs inga data för att beskriva transportprocesserna där. Data för inventarium, kapselskadans storlek, fördröjningstid, bränsleupplösning, speciering och lösning/fällning har diskuterats i tidigare avsnitt.

9.9.3 Transportprocesser i buffert/återfyllning

Advektion

På grund av buffertmaterialets låga hydrauliska konduktivitet förväntas all transport av lösta ämnen i buffert efter vattenmättnad ske genom diffusion.

Återfyllningen har en hydraulisk konduktivitet respektive diffusivitet som ligger i ett område där både diffusion och advektion kan vara viktiga transportmekanismer. Beräkningar /Moreno, 1999/ visar dock att även med ett mycket högt flöde genom återfyllningen blir uttransporten av radionuklider högst en faktor två större än i fallet med endast diffusion, varför advektionen kan försummas även i bufferten.

Diffusion och sorption i återfyllningen

Transporten genom bufferten sker med olika diffusionsmekanismer. Mekanismerna beskrivs närmare av Yu och Neretnieks /1997/ och i Processrapporten.

Det är klarlagt att vissa katjoner kan ha höga diffusiviteter (transporteras effektivt). En möjlig förklaring till fenomenet är teorin om ytdiffusion. Processen hanteras genom att ge högre diffusivitetsvärden för elementen Cs, Sr och Ra.

När bentonit har så hög densitet att de elektriska dubbellagren mellan två plan överlagras uppträder ett fenomen kallat anjonexklusion. Anjoner kan inte tränga in

i de interlamellära porerna på grund av de elektrostatiske krafterna mellan de negativt laddade ytorna och anjonen. Anjonexklusion minskar avsevärt den tillgängliga porositeten för diffusion. Vid höga salthalter blir effekten av anjonexklusion mindre och i bergkross/bentonitblandningar är den försumbar.

Radionuklider kan sorberas till montmorillonitens ytor /Yu och Neretnieks, 1997; Processrapporten/. Vid beräkningar av radionuklidtransport beskrivs sorptionsjämvikten normalt som ett linjärt samband mellan den sorberade koncentrationen och koncentrationen i lösning, med en distributionskoefficient K_d . När koncentrationen i lösning är låg, vilket normalt är fallet för radionuklider, ger den linjära approximationen ett tillfredsställande resultat. Distributionskoefficienten K_d är dock ett uppmätt värde som bara gäller för de förhållanden som det aktuella värdet mättes under, och det kan egentligen inte extrapoleras till andra förhållanden. Osäkerheten i processbeskrivningen måste därför hanteras genom valet av K_d -värden.

Avgörande för sorptionen och diffusionen är radionuklidens kemiska form som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering. Den påverkas av vilken speciering nukliden hade vid randen till bufferten, dvs inuti kapseln (se avsnitt 9.7.6), men också av de kemiska förhållandena i bufferten. De data som används för diffusion och sorption är baserade på en (eller flera) vattensammansättningar som kan förekomma i bufferten.

Yu och Neretnieks /1997/ för en detaljerad diskussion om olika experimentella metoder och hur resultaten kan tolkas. Ochs /1997/ granskar och sammanfattar osäkerheterna kring diffusion och sorption i bentonit.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Yu och Neretnieks /1997/ och Ochs /1997/ har utvärderat olika publicerade mätningar av diffusions- och sorptionsegenskaper i vattenmättad bentonit och kritiskt utvärderat olika felkällor. Värdet på parametrarna beror bl a på porvattnets jonstyrka. Ochs /1997/ påpekar dock att porvattnet i bentoniten kommer att ha en hög jonstyrka, oavsett det omgivande grundvattnets sammansättning, eftersom bentoniten innehåller lösliga föroreningar t ex CaSO_4 och NaCl . Buffertens redoxkapacitet och den stora mängden järn i kapseln innebär vidare att oxiderande förhållanden inte kan råda i bufferten. För de flesta ämnen ges porositeten av bentonitens specifikation, men för vissa ämnen måste porositeten minskas för att kunna representera anjonexklusion. Med dessa förutsättningar väljs ämnesspecifika värden på fördelningsfaktorer (K_d) och effektiv diffusivitet (D_e) från de värden för bästa uppskattning som anges av Yu och Neretnieks /1997/. Pessimistiska K_d -värden erhålls genom att välja de lägsta värdena som ingår i angivna osäkerhetsintervall. Tabell 2-6 i bilaga 2 redovisar vilka värden som valts. Värdena beror på porvattnets kemiska sammansättning och är därmed principiellt korrelerade till andra indata som beror på de kemiska förhållandena.

Återfyllningen antas i analysen bestå av en blandning av 15 procent bentonit och 85 procent bergkross. Sorptionsdata (K_d) erhålls genom att proportionellt vikta värdena för bentonit och för berg med 15 respektive 85 procent. I bentonitandelen antas porvattnets jonstyrka vara densamma som i grundvattnet i berget, vilket för bästa uppskattning innebär salina förhållanden för Aberg och icke salina förhållanden för Beberg och Ceberg. Eftersom bentoniten bara förekommer i utblandad form uppkommer inga jonexklusionseffekter. Diffusiviteten kan därför väljas som diffusiviteten i vatten (omkring 10^{-10} m²/s). Porositeten bestäms väsentligen av bentonitens porositet och sätts till 30 procent. I praktiken har återfyllningens transportegenskaper liten betydelse.

Därför väljs inga pessimistiska värden. Data framgår av tabellerna 2-7 och 2-8 i bilaga 2. Värdena beror på porvattnets sammansättning och är därmed principiellt korrelerade till andra indata som beror på de kemiska förhållandena.

Kolloidtransport i bufferten och kolloidfrigörelse

Bufferten utgör en effektiv spärr mot de kolloider som eventuellt bildas inne i kapselns hålrum /Processrapporten/. Funktionen har demonstrerats experimentellt.

Montmorillonit från den expanderande bufferten kan tränga in i sprickor kring deponeringshål. Grundvattnet i sprickorna skulle sedan kunna erodera bufferten och därmed ge upphov till lerkolloider i grundvattnet, men experiment utförda i laboratorie-skala med granitiskt grundvatten ger försumbart små halter /Processrapporten/.

Vid beräkningen av radionuklidtransporten försummas därför kolloidtransport i bufferten och kolloidfrigörelse från buffertens yta.

9.9.4 Massöverföring mellan buffert/återfyllning och geosfär

Massöverföringen från buffert och återfyllning till det strömmande grundvattnet i berget sker med diffusion. Effektiviteten i överföringen beror därmed på geometrin i kontakten mellan de flödesvägar som direkt eller indirekt har kontakt mellan buffert/återfyllning.

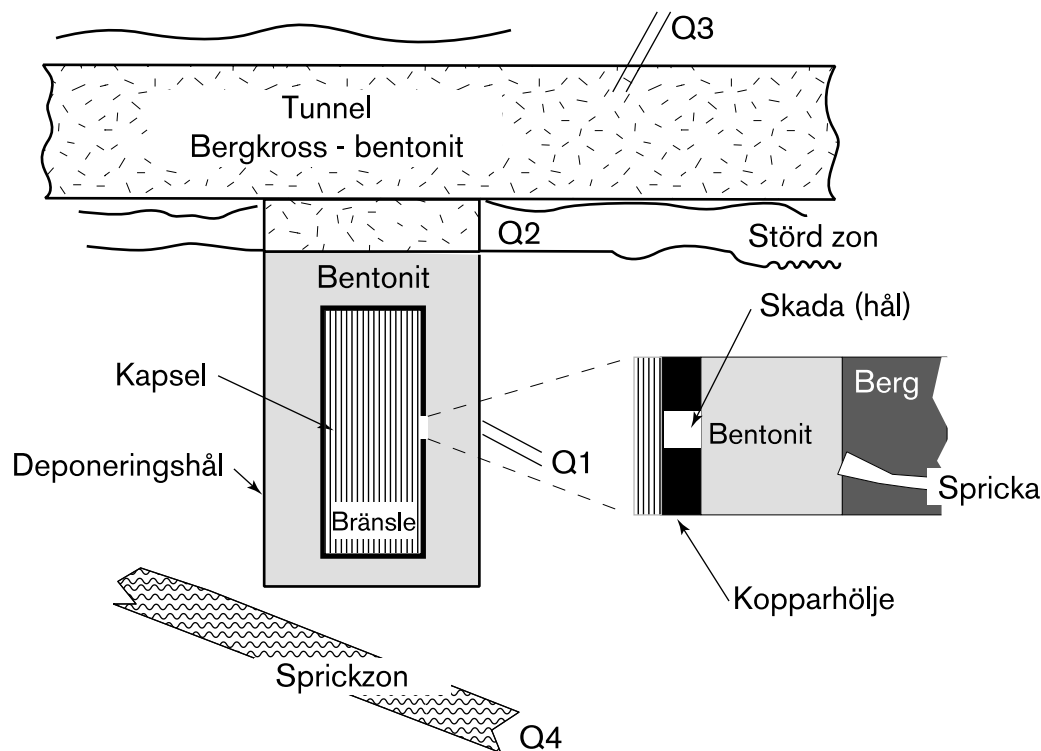
Massöverföringen kan beskrivas med begreppet ekvivalent flöde (Q_{eq}) /Moreno och Gylling, 1998/. Det ekvivalenta flödet är inget egentligt flöde, men beräknas /Neretnieks, 1979/ med s k gränsskiktsteori så att massöverföringen motsvarar produkten av det ekvivalenta flödet och koncentrationen av radionukliden på randen mellan buffert/återfyllning och det strömmande grundvattnet. Det ekvivalenta flödet (Q_{eq}) beror på geometrin (längden, vidden och porositeten) för kontakten med flödesvägen, på diffusiviteten och på storleken av grundvattnets specifika flöde.

Det finns inga tillkommande osäkerheter om de processer (diffusion) som styr massöverföringen men indirekt uppstår osäkerheter från osäkerheterna i geometri och grundvattenflöde. Eftersom berget är heterogent varierar både geometri och grundvattenflöde mellan olika kapselpositioner. Till varje kapselposition kan det dessutom finnas flera flödesvägar i berget som har kontakt med buffert och återfyllning.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Vid beräkningen av radionuklidtransport antas /Moreno och Gylling, 1998/ att transporten genom bufferten ut till det strömmande grundvattnet i geosfären kan gå via fyra olika vägar, figur 9-23:

1. direkt in i en spricka som skär deponeringshålet mitt för skadan i kapseln,
2. in i den störda zonen som antas finnas kring deponeringstunneln,
3. via tunnelns återfyllning och vidare in i en sprickzon som antas skära tunneln,
4. via diffusion genom berget in i en antagen sprickzon i berget.



Figur 9-23. Schematisk illustration av de olika transportvägar (Q1–Q4) som behandlas i närområdesmodelleringen /från Moreno och Gylling, 1998/.

De specifika flöden, q_0 , som beräknas med den stokastiska kontinuum-modellen i platskala för respektive plats, se avsnitt 9.8, används för att uppskatta flödena för dessa olika vägar. Den rimliga uppskattningen väljs från medianen av basfallet för respektive plats, medan det pessimistiska fallet väljs som 95-percentilen av den variant som har de högsta flödena för respektive plats. Skillnaden mellan platser är betydande.

Skillnaden mellan rimlig uppskattning och pessimistiska värden för specifika flöden avspeglar den rumsliga variationen hos platsen. Flödet beror av kapselpositionen. Den beräknade statistiska fördelningen inom och mellan realiseringar kan användas i probabilistisk analys. Skillnaden mellan varianter (för samma plats) är relativt liten varför den statistiska fördelningen kan baseras på de basfall som beräknats för de olika platserna. Spridningen härrör huvudsakligen från den rumsliga variationen inom en realisering. Den rumsliga variationen utgör i sig ingen osäkerhet, men resulterar i en osäkerhet eftersom det inte går att förutsäga vilken (eller vilka) kapslar som har initiala defekter. Läget för kapselpositioner med högt specifikt flöde växlar mellan olika realiseringar, även om det finns vissa områden som alltid har högre, respektive lägre flöde. Något försök att utnyttja kunskapen om flödesfördelning genom att bara välja positioner med lågt flöde har inte gjorts.

Det specifika flöde som beräknats med kontinuum-modellen avser ett medelvärde över ett block om cirka $30 \times 30 \times 30 \text{ m}^3$. Flödet för de olika kontaktvägarna beräknas som olika multiplar av q_0 . Flödet för en spricka som korsar deponeringshålet (q_1) antas som rimlig uppskattning vara densamma som q_0 , men jämförelse med resultat från en diskret nätverksmodell, se avsnitt 9.8, antyder att q_1 kan vara cirka en faktor fem gånger q_0 . q_1 antas därför pessimistiskt vara $5q_0$. Den sprängstörda zonen i tunnelbotten antas innebära att flödet där (q_2) kan vara tio gånger större än medelflödet och som mest

100 gånger större än medelflödet /Datarapporten/. Flödena vid en sprickzon som korsar tunneln (q_3) eller vid en sprickzon inne i berget (q_4) har liten betydelse. Som rimliga värden används $q_3=q_4=100 q_0$ och som pessimistiska $q_3=1\ 000 q_0$ och $q_4=10\ 000 q_0$. Porositeten antas som mest uppgå till 10^{-3} i kontakten med sprickzonerna, medan lägre värden antas för kontakten mellan spricka och deponeringshål.

Tabellerna 2-9 och 2-10 i bilaga 2 redovisar de indata som används. Det specifika flödet i närområdet är korrelerat till gångtiden i geosfären. Högt flöde innebär ofta kort gångtid.

9.9.5 Diffusion/matrisdiffusion i geosfären

När grundvattnet rör sig kan diffusionen i det strömmande vattnet försummas. Berget som ligger mellan de sprickor där grundvattnet strömmar innehåller dock mikrosprickor med stagnant grundvatten där radionuklider kan diffundera in genom s k matrisdiffusion /Processrapporten/. Matrisdiffusionen innebär att radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och på så sätt undandras och transporteras långsammare än det flödande vattnet. Av ännu större betydelse är att matrisdiffusionen ger möjlighet för sorption på bergmatrisen.

Förekomsten av ett förbundet system av mikrosprickor i granitiskt berg har bekräftats med försök i både laboratorium /Skagius och Neretnieks, 1985; Skagius, 1986/ samt i fält /Birgersson och Neretnieks, 1988/. I vatten med låg jonstyrka har anjoner en lägre diffusion in i matrisen än motsvarande oladdade partiklar med i övrigt identiska egenskaper. Detta beror på en jonexklusionseffekt där de negativt laddade anjonerna repelleras från de negativt laddade porytorna och därför har en mindre effektiv volym till förfogande för diffusion /Ohlsson och Neretnieks, 1997/. För katjoner som undergår jonbyte kan diffusionen förstärkas genom fenomenet ytsorption. I detta fall diffunderar radionukliderna även i den sorberade fasta fasen /t ex Skagius, 1986/.

Matrisdiffusionens betydelse för transport av radionuklider bestäms förutom av matrisens diffusions- och sorptionsegenskaper även av sprickornas geometri samt flödets magnitud (den advektiva hastigheten) i sprickorna, se vidare nedan.

Matrisdiffusion är en process som är svår att kvantifiera och därmed behäftad med förhållandevis stora osäkerheter. Även om man i laboratorieförsök kunnat påvisa diffusion in i bergsmaterial är det betydligt svårare att entydigt visa detta under fältförhållanden. Naturliga analogier i form av geologiska formationer med förhöjd naturlig radioaktivitet kan användas för att verifiera matrisdiffusion som en process som ägt rum under långa tidsperspektiv. Denna typ av analogier som finns t ex vid Palmottu i Finland, Alligator Rivers i Australien samt Cigar Lake i Kanada erbjuder en möjlighet till förbättrad processförståelse /Miller m fl, 1994/.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Diffusiviteten i bergmatrisen är ämnesspecifik. Data uppskattas från diffusionsförsök /Johansson m fl, 1996/, med tritierat vatten (HTO) och med några katjoner i salt vatten, utförda på bergsmaterial från Äspö (dvs Aberg). Diffusiviteter för andra ämnen erhålls /Ohlsson och Neretnieks, 1997/ genom att skala med de olika ämnenas diffusivitet i fritt vatten och genom att ta hänsyn till möjligheterna för anjonexklusion och för ytdiffusion. En rimlig uppskattning erhålls genom att ta hänsyn till alla dessa effekter, medan pessimistiska värden erhålls genom att inte ta hänsyn till (osäkra) processer som leder till höga diffusiviteter samt genom att konsekvent välja ofördelaktig vattensammansättning.

Diffusivitetens värden gäller i princip för obegränsat inträngningsdjup. Av symmetriskäl kan dock inte indiffusionen ske obehindrat längre än in till halva bergmatrisblockets storlek. Denna storlek är indirekt relaterad till den flödesvätta ytan per volym berg /Andersson m fl, 1998/. Av modellskäl sätts därför det maximala penetrationsdjupet till två meter för Aberg och Beberg och 20 meter för Ceberg, vilket ungefär motsvarar avståndet mellan konduktiva sprickor vid respektive plats. Det verkliga inträngningsdjupet för sorberande nuklider blir mycket kortare och det finns dessutom anledning att tro att matrisporositet och diffusivitet varierar i rummet. De använda teoretiskt maximala värdena bör därför inte tillmätas någon stor betydelse.

Tabellerna 2-11 och 2-12 i bilaga 2 redovisar de indata som föreslagits. Värdena beror på porvattnets sammansättning och är därmed principiellt korrelerade till andra indata som beror på de kemiska förhållandena.

9.9.6 Sorption i geosfären

Av avgörande betydelse för radionuklidtransporten är även sorption, dvs det faktum att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Termen sorption innefattar en rad olika retentionsprocesser/mekanismer som resulterar i att ett ämne (radionuklid) i lösning i grundvatten fastnar på bergets fasta ytor eller på annat material, t ex lermineral, som kan förekomma på sprickytorna /Processrapporten/.

Styrkan i sorptionen beror av jonernas kemiska egenskaper och förekomst av eventuella komplexbildare. En stor mängd experimentella, nuklidspecifika studier av sorption har genomförts /Carbol och Engkvist, 1995/. Dessa test utförs oftast som batchförsök där en vattenlösning av den aktuella nukliden får ställa sig i jämvikt med det fasta bergmaterialet. Om sorptionen är linjär, fullständigt reversibel och jämvikt råder kan en fördelningskoefficient (K_d) uppskattas för aktuell vattensammansättning. Linearitetsantagandet är oftast uppfyllt vid de låga koncentrationer som är av intresse, medan jämviktsantagandet är uppfyllt om sorptionen har en tidsskala som är mycket kortare än tidsskalan för transport med advektion och dispersion.

Sorption genom ytkomplexering kan principiellt även beskrivas med ytkomplexeringsmodeller. Sådana modeller är generella och välgrundade men kräver en stor mängd svårbestämda data. Därför har resultat av olika experiment med ytkomplexeringsmodeller inte använts för att ersätta fördelningskoefficienterna (K_d -värden), utan för att öka förståelsen av sorptionsmekanismerna och bestämma vad de är beroende av, dvs hur pålitlig sorptionen kan anses vara /Carbol och Engkvist, 1995; Olin och Lehikoinen, 1997/.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Ämnesspecifika sorptionsdata för geosfären i form av K_d -värden erhålls genom att utvärdera olika experimentella databaser och samtidigt ta hänsyn till grundvattnets sammansättning vid de olika platserna /Carbol och Engkvist, 1997/. Grundvattnets sammansättning påverkar ämnens speciering och har därigenom stor betydelse för sorptionen. Det är främst skillnader i salthalt som påverkar K_d -värdena på så sätt att högre salthalt ger sämre sorption. Skillnader i bergarter mellan platserna är av mindre betydelse.

För Aberg väljs värden för salt vatten, för Beberg och Ceberg väljs värden för icke salt vatten. Ett uppenbart pessimistiskt val är att alltid välja de lägsta K_d -värden som observerats, oberoende av vattensammansättning. För Ceberg gäller dock att icke salina

förhållanden kan förväntas gälla även i framtiden (se basscenariot avsnitt 8.9.2). Därför väljs de lägsta icke salina K_d -värdena som pessimistiskt fall för Ceberg.

De föreslagna värdena framgår av tabell 2-13 i bilaga 2. Värdena beror på porvattnets sammansättning och är därmed principiellt korrelerade till andra indata som beror på de kemiska förhållandena.

9.9.7 Advektion/dispersion och massöverföring mellan sprickor och bergmatris

Radionuklider kan transporteras med det strömmande grundvattnet /Processrapporten/. Transporten delas vanligen upp i advektion och dispersion, men uppdelningen är beroende av den studerade skalan och är relativt godtycklig. Den advektiva delen beskriver medelförflyttningen medan den dispersiva delen tar hänsyn till effekter av heterogenitet i berget och hastighetsvariationer på skalor mindre än den som beskrivs av advektionen. I dispersion inkluderas vanligen även processen molekylär diffusion i vatten. Dispersion är ett modellkoncept snarare än en verklig process.

De konceptuella osäkerheterna kring advektion är mycket små. Den naturligt förekommande rumsliga variabiliteten i hydraulisk konduktivitet innebär att även grundvattenflöde och advektiva hastigheter varierar i rummet, vilket leder till osäkerhet. Osäkerheten hanteras, se avsnitt 9.8, genom att beskriva grundvattenströmningen med en stokastisk modell, genom att analysera olika varianter och genom att studera olika konceptualiseringar för grundvattenflöde (diskret sprickmodell, kanalnätverksmodell, samt stokastisk kontinuum-beskrivning).

I modellerna erhålls en storskalig blandning eftersom olika transportvägar har olika grundvattenflöde. Den storskaliga blandningen är den dominerande komponenten i vad som kan kallas dispersion. Den explicita modelleringen av dessa hastighetsvariationer gör att beskrivningen av dispersion i radionuklidtransportmodellen kan minimeras till småskaliga hastighetsvariationer. Dispersionen kommer därmed bara att ha underordnad betydelse för radionuklidtransporten.

Transporten av radionuklider genom berget sker genom advektion i de öppna sprickorna. Om ämnena som är lösta i vattnet inte samverkar med omgivningen bestäms transporthastigheten av vattnets hastighet, vilken kan uttryckas som flödet dividerad med flödesporositeten. Om ämnena dessutom kan diffundera in i bergmatrisen och även sorbera där kommer detta att ge upphov till en betydande fördröjning och den resulterande "transporthastigheten" bestäms då väsentligen av flödet och sprickornas geometri samt av matrisens diffusions- och sorptionsegenskaper. Flödesporositeten är här av underordnad betydelse.

Den geometri- och flödesrelaterade delen av transporten styrs av den så kallade F-faktorn:

$$F = \frac{a_r L}{q}$$

där a_r är den flödesväta ytan per volymsenhet berg, L är transportvägens längd och q det specifika flödet. Alternativt kan F-faktorn uttryckas som produkten av den advektiva gångtiden och den flödesväta ytan per volym vatten, t_{wa_w} , se t ex Andersson m fl, /1998/. Den senare formuleringen används i modellen FARF31, avsnitt 9.11.2, som ingår i beräkningskedjan.

För en mer utförlig diskussion i detta ämne hänvisas till Neretnieks /1980/, Olsson m fl /1995/, Moreno m fl /1995/, Elert /1997/, Andersson m fl /1998/.

Transporttider vid Aberg

De modellberäknade advektiva gångtiderna kan användas för att uppskatta tider för transport av vattenlösta ämnen (eller vattenmolekyler) från förvarsdjup till ytan. Då måste också hänsyn tas till matrisdiffusion, dvs att vattenmolekyler och lösta ämnen kan diffundera in i mikrosprickor i berget där vattnet är i det närmaste stillastående. I själva verket är en stor del av bergets håligheter sådana mikrosprickor och vattenmolekyler och lösta ämnen kommer att tillbringa en övervägande andel av sin transporttid i dessa mikroskopiska porer.

Med hjälp av bl a F-faktorn kan tiden för transport av vattenlösta, icke sorberande ämnen från förvarsdjup till ytan uppskattas med /Neretnieks, 1993/:

$$t_{transport} = t_w + F^2 D_e \varepsilon_p$$

där

$D_e = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{år}$ är diffusiviteten för bl a kloridjoner vid Aberg och $\varepsilon_p = 5 \cdot 10^{-3}$ är porositeten i bergmatrisen.

F-faktorn kan uppskattas antingen som $a_r L/q$ eller som produkten $a_w t_w$ enligt föregående avsnitt.

I avsnitt 9.8.3 uppskattas den advektiva gångtiden t_w vid Aberg till 160 år med en rimlig flödesporositet av $10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$. Med $a_w = 10^3 \text{ m}^{-1}$ (rimligt värde i Datarapporten, kompenserat för den högre flödesporositeten) blir F-faktorn då 160 000 år/m.

Med $a_r = 1 \text{ m}^{-1}$ (rimligt värde enligt Datarapporten), $L = 500 \text{ m}$ och $q = 2 \cdot 10^{-3}$ (rimligt värde enligt Datarapporten) blir F-faktorn 250 000 år/m.

Dessa båda uppskattningar av F-faktorn ger med formeln ovan transporttider av 540 år respektive 1 100 år. Detta demonstrerar bl a att de modellberäknade advektiva gångtiderna vid Aberg är förenliga med observationer av mycket gamla vatten på förvarsdjup.

Formeln ovan förutsätter ett obegränsat inträngningsdjup i bergmatrisen, vilket inte nödvändigtvis är giltigt. Med ett begränsat inträngningsdjup blir transporttiderna för lösta ämnen kortare. Å andra sidan ges åldern hos det observerade vattnet på förvarsdjup vid Aberg av transporttiden ned till förvarsdjup. Därmed bör den advektiva gångtiden för tillflödet användas vid beräkningen. Aberg ligger i ett utströmningsområde och gångtiden från ytan till förvarsdjup är betydligt längre än den från förvarsdjup till ytan. Endast den senare beräknas i den lokala modellen. Detta stärker slutsatsen att de modellberäknade advektiva gångtiderna vid Aberg är förenliga med observationer av mycket gamla vatten på förvarsdjup.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Den stokastiska kontinuum-modellerna i platsskala beräknar advektiva gångtider från olika kapselpositioner och genom geosfären för respektive plats, se avsnitt 9.8. Rimliga gångtider väljs som medianen hos basfallet av den stokastiska kontinuum-modellens resultat, medan den pessimistiska tiden väljs som 95-percentilen av den variant som

har de kortaste gångtiderna. Skillnaden mellan platser är betydande. Skillnaden beror väsentligen på skillnader i tolkad hydraulisk konduktivitet, se diskussion i avsnitt 9.8.

Skillnaden mellan rimlig uppskattning och pessimistiska värden för gångtider avspeglar den rumsliga variationen hos platsen. Gångtiden beror av kapselpositionen. Den beräknade fördelningen av gångtider kan användas i probabilistisk analys. Skillnaden mellan varianter (för samma plats) är relativt liten varför den statistiska fördelningen kan baseras på de basfall som beräknats för de olika platserna. Spridningen härrör huvudsakligen från den rumsliga variationen inom en realisering. Denna utgör i sig ingen osäkerhet, men resulterar i en osäkerhet eftersom det inte går att förutsäga vilken (eller vilka) kapslar som har initiala defekter. Läget för kapslar med korta gångtider växlar mellan olika realiseringar, även om det finns vissa områden som alltid har korta, respektive längre gångtider. Något försök att utnyttja kunskapen om gångtidfördelning genom att bara välja positioner med långa gångtider har dock inte gjorts.

Storleken av den flödesvätta ytan per volym berg (a_r) bedöms /Andersson m fl, 1998/ från utvärderingar av ett fåtal platsspecifika spår försök, geologisk karakterisering, hydrauliska test och modellering. I huvudsak bestäms värdet av den flödesvätta ytan från bedömningar av den konduktiva sprickfrekvensen, som i sin tur baseras på de hydrauliska testerna. Pessimistiska värden av den flödesvätta ytan väljs en faktor tio lägre än värdet som motsvarar bästa uppskattning. Den flödesvätta ytan per volym berg (a_r) omräknas till flödesvätt yta per volym vatten (a_w) genom att dividera med den flödesporositet (10^{-4}) som använts vid beräkning av advektiva gångtider (t_w). F-faktorn, produkten $a_w t_w$, blir därmed oberoende av flödesporositeten. Flödesporositeten har därför liten inverkan på transportberäkningarna.

Beräkningen av F-faktorn, med den metod som beskrivs här, förutsätter i princip att flödet är jämnt fördelat inom elementen i kontinuumbeskrivningen. F-faktorer som beräknats med kontinuum-modellen och med den diskreta nätverksmodellen blir dock relativt lika /Datarapporten/. Det är därför rimligt att använda de antagna värdena på t_w och a_w , även om denna jämförelse inte utgör något formellt bevis.

Den hydrodynamiska dispersionen längs transportvägarna innebär bara en sekundär påverkan på fördröjningen genom geosfären, jämfört med den stora variationen i F-faktorer /Andersson m fl, 1998/. Litteraturdata för Peclet-tal faller inom intervallet 2–40 /Elert m fl, 1992/. Oberoende av plats väljs tio som rimlig uppskattning och två som pessimistiskt värde. För snabba utsläpp av långlivade nuklider blir dock fördröjningen mindre om man antar liten dispersion (höga Peclet-tal).

De valda data framgår av tabell 2-14 i bilaga 2. Flödet i närområdet är korrelerat till gångtiden i geosfären. Högt flöde innebär ofta kort gångtid (låg F-faktor).

9.9.8 Kolloidtransport i geosfären

Sorberande radionuklider skulle i princip kunna transporteras mer eller mindre ofördröjda med vattnets hastighet om de fastnade på kolloidala partiklar i grundvattnet /Processrapporten/.

Observationer i naturen visar att kolloider finns i djupa grundvatten i form av mineralpartiklar som innehåller t ex kisel, aluminium och järn. Det finns även mätningar som tyder på att mineralpartiklar kan transporteras hundratals meter som kolloider /Hofmann, 1989/. Sådana partiklar kan ta upp radionuklider och i naturen finner man t ex kolloider med uran och torium /Miekeley m fl, 1992/. I testområdet för kärnvapen

i Nevada, USA, har man analyserat plutonium i kontaminerat grundvatten från underjordiska kärnvapenprov och även där funnit kolloider /Kersting, 1999/. Proverna är tagna 1,3 km från sprängningens centrum. Även om dessa observationer diskuteras livligt stöder de uppfattningen att kolloider kan transportera radionuklider långa sträckor i berget.

På förvarsdjup i svensk berggrund är koncentrationen av kolloider låg /Laaksoharju m fl, 1995/. Detta beror på att djupt grundvatten är starkt mineraliserat, dvs innehåller mycket lösta salter.

Är upptaget av radionuklider på kolloidala partiklar reversibelt kan detta hanteras med en sänkning av K_d -värdet där sänkningen är omvänt proportionell mot koncentrationen av kolloider och sorptionsbenägenheten på kolloiderna. Sänkningen är dock försumbar vid maximala kolloidkoncentrationer i svenskt berg /Allard m fl, 1991/. Även om nukliden fastnar irreversibelt visar beräkningar, sammanfattade av /Allard m fl, 1991/ att processen kan försummas på grund av den låga naturliga koncentrationen av kolloider.

Baserat på ovanstående resonemang har SKB inte funnit anledning att utveckla någon speciell transportmodell för denna mekanism.

9.9.9 Radionuklidtransport i gasfas

Radionuklidtransport i gasfas hanteras med överslagsberäkningar, se avsnitt 9.11.2.

9.10 Radionuklidomsättning i biosfären

I kapseldefektscenariot analyseras spridning av radionuklider från förvaret till människa och natur i förvarets närhet. Därför krävs en betydligt mer detaljerad analys av biosfärsförhållandena än vad som är fallet för basscenariot.

Biosfären är i jämförelse med förvarssystemet (bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär) betydligt mer heterogen, komplex och föränderlig och det är svårt att genomföra en lika strikt och uttömmande processbeskrivning för biosfären som för övriga delar. Radionuklidomsättning i biosfären styrs dock av en begränsad uppsättning processer som översiktligt låter sig beskrivas i generella termer.

Den kvantitativa beskrivningen beror av i vilket ekosystem processerna äger rum. För att kvantifiera radionuklidomsättning för säkerhetsanalysen beräknas först spridningen i ett antal typiska ekosystem för enhetliga radionuklidutsläpp till dessa, sedan uppskattas dosen till människor. Beräkningarna resulterar i en ekosystemspecifik doskonverteringsfaktor (ett EDF-värde), för varje ekosystem och nuklid. EDF-värdet uttrycker vad ett kontinuerligt radionuklidutsläpp till ekosystemet (Bq/år) resulterar i för kontinuerlig dosbelastning (Sv/år) till människor i omgivningen då utsläppet pågått i 10 000 år. Enheten för EDF-värdet blir därmed Sv/Bq.

För tillämpningen i säkerhetsanalysens beräkningar delas de tre förvarspplatserna in i mindre områden och varje område klassificeras som något av de typiska ekosystemen. Därefter kan platsspecifika och tidsberoende utsläpp av radionuklider till biosfären omvandlas till uppskattningar av doser till människor. Detta genomförs som ett sista led i den kopplade beräkningen av radionuklidtransport, avsnitt 9.10.

I detta avsnitt redovisas:

- en generell beskrivning av de viktigaste grupper av processer som styr radionuklidomsättningen i biosfären,
- bestämningen av EDF-värden för ett antal typekosystem samt
- indelningen av de tre förvarsplatserna i typekosystem.

Biosfärsavsnittet avslutas med en diskussion av de uppnådda resultaten.

9.10.1 Processer i de ytnära ekosystemen

När grundvatten från djupet når lösa avlagringar ovan berget, ökar inblandningen av ytnära grundvatten. Transporthastigheterna blir oftast högre eftersom avlagringarna är förhållandevis genomsläppliga. Detta gör att det djupa grundvattnet kan spädas och spridas avsevärt i det ytliga grundvattnet. När vattnet når ett vattendrag, sjö eller hav sker en ytterligare spädning genom omblandning med strömmar. Utspädning och spridning är beroende av nederbörd, avdunstning och transport av vattenmassor med vattendrag eller strömmar. Lösta ämnen, t ex radionuklider, följer det djupa grundvattnets spädning och spridning vid ytan.

Kemiska, fysikaliska och biologiska processer i de ytnära ekosystemen kan fälla ut lösta ämnen eller leda till att de absorberas i partiklar och organismer. Övergången från syrefria till väl syresatta förhållanden påverkar många lösta ämnens egenskaper. Den höga halten av organiska ämnen, t ex humus, gör också att många lösta ämnen reagerar med eller adsorberas till partiklar.

Organismer, framför allt växter och mikrober, kan aktivt ta upp lösta ämnen och därmed hålla kvar och anrika t ex radionuklider. Även de finare fraktionerna i de lösa avlagringarna, t ex leror, kan sorbera de lösta ämnena i vattnet på samma sätt som i bentonitbufferten i djupförvaret. Detta ger en fördröjning eller till och med anrikning i utströmningsområden.

Partikelbundna ämnen får andra transportegenskaper, tyngre partiklar kan t ex sedimentera i sjöar och hav, vilket ger en nedåtgående transport genom vattnet. Partiklar kan också förflyttas av kraftiga vattenströmmar, vind, isrörelser eller ras. Organismer som musslor och svampdjur kan filtrera stora mängder vatten och därmed fastlägga partiklarna i organiskt material.

Alla ämnen som via aktivt upptag eller sorption fastnat i organismer kommer att transporteras vidare i den biologiska näringsväven. Organismen kan ätas av en annan organism som får i sig de främmande ämnena. Vissa ämnen tenderar att bindas i organismer och kan anrikas för varje sådan passage, så kallad biomagnifikation.

Alla organismer söker sig till eller utnyttjar aktivt näringsrika områden. Växter styr rottillväxt till näringsrika områden, djur kan leta upp eller jaga lämplig föda. Också bakterier kan röra sig mot näringsrikare områden. Alla organismer reagerar på näringsrikedom genom att föröka sig tills de blir begränsade av någon resurs. Det betyder att biologiska processer kan ge ökade koncentrationer av ämnen till skillnad från de flesta fysikaliska och kemiska processer som utjämnar skillnader i koncentration av ämnen.

De flesta organismer påverkar också den fysiska och kemiska miljön i sin omgivning. Växter, bakterier och svampar utsöndrar syror eller organiska komplexbildare för att frigöra ämnen bundna till t ex mineralpartiklar. Detta gör att de kan utnyttja begränsade

näringsämnen effektivt. Samtidigt påverkas andra ämnen, bl a radionuklider, som också kan mobiliseras och tas upp i t ex växter. Växter kan med sitt rotsystem transportera ämnen till ytan. Maskar kan också förflytta fast material från djupare till grundare avlagringar. De påverkar också den kemiska miljön genom att syre lättare kan tränga ned i maskgångarna i sediment och avlagringar.

Omfattningen av de biologiska processerna bestäms av ekosystemens sammansättning, som i sin tur påverkas av klimat (temperatur, nederbörd och solinstrålning), tillgången till vatten och näringsämnen (kväve, fosfor, järn m fl) samt syreförhållanden. Sammansättningen påverkas också i hög grad av störningar (t ex isskrap, skred och bränder), men också av människans olika aktiviteter (t ex jord- och skogsbruk) liksom av växelverkan mellan olika organismer (t ex invasion av främmande arter).

I sammanfattning förekommer två motriktade förlopp i de ytnära ekosystemen: Å ena sidan en spridning och spädning med bl a ytvattnet, å den andra en anrikning och utfällning genom kemiska och biologiska processerna. Båda förloppen är viktiga för radionuklidtransporten.

9.10.2 Beräkning av ekosystemspecifika dosomvandlingsfaktorer (EDF)

Processerna som beskrevs i generella termer i föregående avsnitt får olika kvantitativ betydelse för radionuklidspridningen i olika ekosystem. I SR 97 har radionuklidspridning och dosbelastning modellerats i ett antal typekosystem enligt Bergström m fl /1999/:

- Kust och skärgårdsområde.
- Sjö.
- Rinnande vatten, bäck, flod.
- Våtmarker, torvmossar.
- Jordbruksmark.
- Brunn.

Skog har ansatts som likvärdig med torvmark, vilket bedöms vara pessimistiskt.

Vid beräkningarna används två kopplade modeller. Den första är en transportmodell för att beräkna omsättningen av radionuklider i typekosystemet. Den andra används för att beräkna hur människan exponeras för strålning från radionuklider givet omsättningen.

Radionuklidspridning i ekosystemets reservoarer

I transportmodellen indelas ekosystemet i ett antal reservoarer, t ex vatten, jord och sediment. Inom en reservoar antas radionukliderna vara homogent fördelade. Flödet av nuklider mellan reservoarerna beskrivs med överföringskoefficienter som kan uppskattas med hjälp av uppgifter från den aktuella platsen (t ex vattenomsättning) samt ämnens egenskaper (t ex sorptionen på olika material). I modellen beräknas innehållet av radionuklider i de olika reservoarerna som funktion av tid.

I beräkningen tillförs systemet kontinuerligt 1 Bq/år av varje radionuklid och utvecklingen under 10 000 år simuleras. Systemet har efter den tiden vanligen nått ett stationärt tillstånd där det kontinuerliga tillflödet balanseras av radioaktivt sönderfall, förluster till sänkor som sediment eller export över systemgränsen med t ex ett vattenflöde. Den situation som då inställt sig med specifika koncentrationer av radionuklider i de olika reservoarerna utgör resultatet av beräkningen med transportmodellen.

Stråldos till människa

De specifika koncentrationerna används för att beräkna stråldosen till människa. Både så kallad intern exponering från radionuklider som inandas eller äts i form av kontaminerad föda och extern exponering via direktstrålning från nuklider i omgivningen beräknas.

Koncentrationen av radionuklider i födoämnen (t ex fisk och potatis) beräknas med fördelningsfaktorer som beskriver koncentrationen i organismer i förhållande till koncentrationen i de reservoarer där de förekommer. Storleken på dessa faktorer beror bl a på de ämnen som ingår och organismernas egenskaper. För många nuklider finns data från fältmätningar eller laboratorieundersökningar som kan användas för att beräkna fördelningskoefficienten, för andra härleds koefficienten från jämförelser med likartade ämnen.

Människor förutsätts i modellen enbart livnära sig på de födoämnen som produceras lokalt. Intaget av kontaminerade födoämnen späds alltså inte ut av andra livsmedel. Ingen hänsyn har heller tagits till att radionuklider förs bort vid rensning eller tillagning av matvarorna, se vidare Bergström m fl /1999/.

Genomförande av beräkningar

Båda modellerna konstrueras i programmet ACTIVI som är ett delprogram i BIOPATH /Bergström m fl, 1982/ som också används vid själva beräkningen. Variationen i EDF-värdet beroende på osäkerheter och variationer i indata beräknas i programmet PRISM /Gardner m fl, 1983/.

EDF-värdena bestäms således probabilistiskt och resultaten blir statistiska fördelningar. Dessa kan utnyttjas dels direkt till probabilistiska analyser, dels för att uppskatta rimliga och pessimistiska EDF-värden. Som rimligt värde ansätts medelvärdet av fördelningen och som pessimistiskt väljs det värde som 99 procent av realiseringarna underskrider, den s k 99-percentilen.

I Bergström m fl /1999/ beskrivs modellerna för EDF-värden för typekosystemen sjö, rinnande vatten, kustområde (öppen kust och skärgård), jordbruksmark och torvmark. Dessutom modelleras exponering från kontaminerat grundvatten via brunnar. Omsättning av radionuklider i skogsmark har inte modellerats, eftersom det saknas data för de flesta nuklider utom cesium. För skogsmark används inom SR 97 i stället EDF för torvmark, vilket som nämnts bedöms vara pessimistiskt.

Här följer översiktliga beskrivningar av modellerna av de viktigaste typekosystem vid beräkningarna av radionuklidtransport i avsnitt 9.10, nämligen torvmosse och brunn. Även typekosystemet kustområde beskrivs eftersom det används i scenariot som hanterar klimatförändringar. Modellerna av samtliga typekosystem beskrivs i detalj i Bergström m fl /1999/.

Torvmossar – våtmarker

Många lösta ämnen, bl a de flesta radionuklider, har en stark tendens att tas upp och samlas i torv. Typekosystemet för torvmark behandlar radionuklider som når torvmossar och våtmarker från utflöden av grundvatten. Fördelningen av radionuklider i torven antas vara homogen. Viktiga processer är adsorptionen av radionuklider till torv, de processer som sker i jorden när torven används som jordförbättringsmedel samt upptag i organismer. Den totala adsorptionen och koncentrationerna i torv bestäms av torvmängden som finns i området. Nederbörden är den enda platspecifika informationen

som används vid beräkningarna. Torven används för odling eller eldas i värmeverk och privata hushåll.

Människan exponeras via konsumtion av mjölk, kött, spannmål, grönsaker och rotfrukter, samt genom att andas in radionuklider som finns i damm från torven och i rökgaser från torvförbränningen. Även direktstrålning från torven beaktas. De största dosbidragen kommer för de flesta nuklider från odlade grödor. Det gäller t ex för Ra-226 som långsiktigt kan dominera den totala riskbilden.

Torvmarken är det ekosystem som ger de högsta EDF-värdena för de flesta radionuklider, vilket betyder att torvrika områden är de potentiellt sämsta ur denna aspekt. Torvmarker är vanligt förekommande och de bildas naturligt som en följd av landhöjning i havsområden eller vid igenväxning av sjöar och därför är sannolikheten hög att utströmning sker till en våtmark under någon period. Den potentiella exponeringen för radionuklider från torvmark kräver dock en ytterligare åtgärd, t ex utdikning och torvbrytning alternativt uppodling. Därför kan torvmarker under långa tidsperioder (tusentals år) fungera som en effektiv barriär för radionuklider som når de ytnära ekosystemen. Doserna blir däremot högre om radionuklider frigörs genom någon åtgärd.

Sådana långsiktiga förändringar inom ett ekosystem beaktas inte i dagens modeller, som till sin natur är jämviktsmodeller som förutsätter konstanta förhållanden. En eventuell vidareutveckling till tidsberoende modeller skulle kunna ge tidsberoende "EDF"-värden som under långa perioder skulle vara lägre än de nu använda tidskonstanta värdena.

Brunn

Brunnen antas innehålla grundvatten som kontaminerats med radionuklider från djupförvaret. Brunnen beskrivs som en reservoar där omsättningen av vatten antas vara medelvärdet för befintliga brunnar på den aktuella platsen. I själva brunnen bortses från all sorption. Vattnet i brunnen används som dricksvatten för människor och boskap och för bevattning av ett mindre trädgårdsland där grönsaker odlas för att sedan konsumeras av de boende. Nederbörds mängden som blandas med bevattningsvattnet är platsspecifik. Viktiga processer vid bevattningen är retention av nuklider i jord och på växter, transport i jorden av markorganismer samt omfördelning av upptagna radionuklider till växternas ätliga delar.

Människor exponeras genom konsumtion av dricksvatten, odlade grönsaker och rotfrukter samt genom mjölk och kött från boskap som druckit kontaminerat vatten. Extern exponering från trädgårdslandet liksom inandning av damm från detta beaktas också.

Kustområde

Typekosystemet för kusten behandlar den svenska Östersjökusten. Modulen har två delar för att i beräkningarna kunna hantera både en skärgård och en öppen kust, med vattenutbyte mellan de båda. Inflödet av radionuklider kan ske i skärgården eller direkt till den öppna kusten. Vattnet i de olika delarna antas vara homogent blandat. Viktiga processer är vattenomsättning, upptag i biota samt sedimentation och dess motsats; resuspension. Vattenomsättningen är platsspecifik och beror på områdenas volymer och öppenhet mot havet samt väder och vattenståndsvariationer. Upptaget i biota beräknas med fördelningsfaktorer som för modulerna sjö och rinnande vatten.

Exponering antas ske via konsumtion av fisk, vattenväxter (alger) samt mjölk och kött från boskap som druckit av vattnet och ätit kontaminerade vattenväxter.

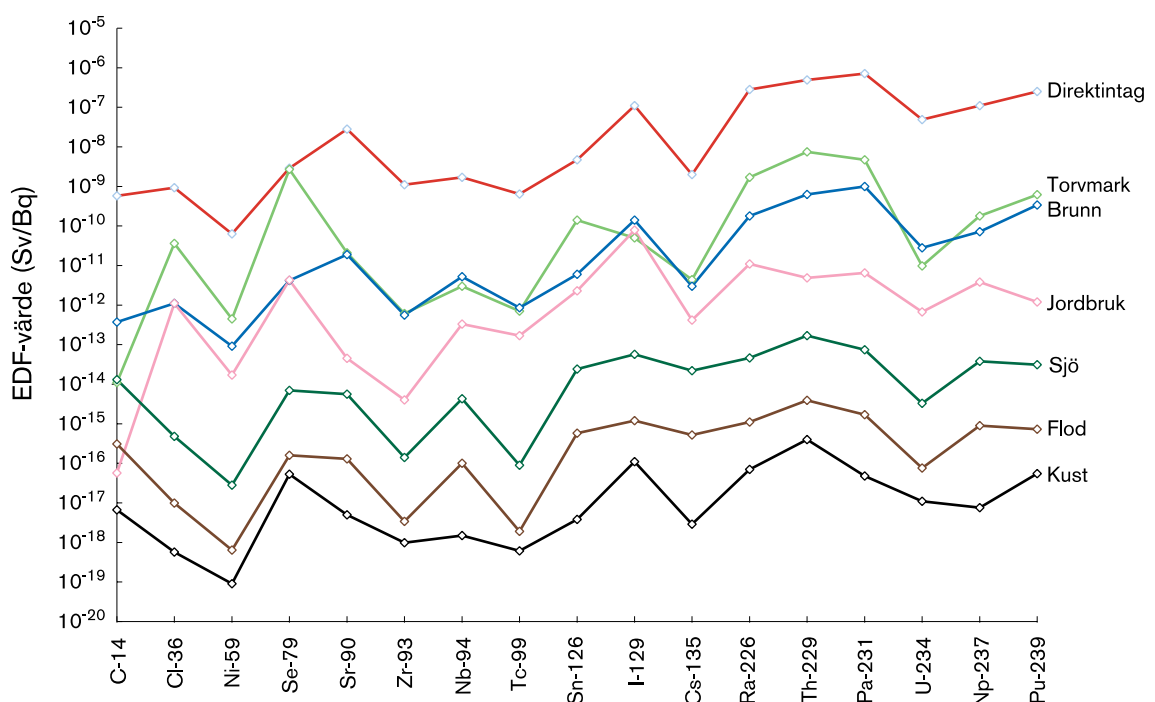
Kustområdet ger i allmänhet låga EDF-värden beroende på det stora vattenutbytet och en begränsad användning av vattnet; det används t ex inte som dricksvatten. Troligen är effekten av vattenutbytet överdriven eftersom en stor del av radionukliderna antagligen kommer att vara bundna till partiklar och dessa har en längre omsättningstid än vatten. Om grundvattnet med radionukliderna passerar genom sedimenten istället för att som i nuvarande modell mynna direkt i recipienten kommer troligen en stor del bindas i sedimenten av de processer som pågår där (se ovan). Det ger lägre koncentrationer i vattnet, dvs lägre EDF-värden en lång period. Då sediment som ackumulerat radionuklider en lång tid utsätts för vågsvallning på grund av landhöjning, kan högre koncentrationer frisättas under en kort tid. Det kan ge högre EDF-värden än de framräknade. Effekten av detta utreds för närvarande i säkerhetsanalysen för SFR, SAFE projektet /Andersson m fl, 1998a; Andersson m fl, 1998b/.

9.10.3 Data till beräkningar av radionuklidtransport

För beräkningarna av radionuklidtransport i avsnitt 9.10 krävs dels EDF-värden för de olika typekosystemen, dels en indelning av markområdet ovan förvaret i typekosystem.

EDF-värden

Resultatet av beräkningarna av de ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorerna för brunn, jordbruksmark, torvmark, kust, sjö, flod visas i figur 9-24. I figuren finns också för jämförelse dosomvandlingsfaktorer för direktintag av respektive nuklid med föda.



Figur 9-24. EDF-värden för ett urval av radionuklider i olika typekosystem representativa för Aberg, Beberg och Ceberg. Direktintag avser dosomvandlingsfaktorn vid intag med föda. För en fullständig lista se Nordlinder m fl /1999/.

Det framgår att EDF-värdena för många av typekosystemen skiljer sig med en faktor som i stort sett är oberoende av radionuklid. Formen för dessa kurvor liknar dessutom den för direktintag. Anledningen till likheterna är att varierande utspädning är den faktor som skiljer modulerna mest från varandra och denna faktor påverkar alla nuklider lika. För torvmark och jordbruksmark sker en ackumulation under längre tid och utspädningen är långsammare, därför avviker dessa ekosystem från mönstret.

Beskrivning och klassificering av platsernas typekosystem

För att kunna använda EDF faktorerna måste de olika platserna indelas i olika typekosystem. I Nordlinder m fl /1999/ beskrivs indelningen för de tre platserna. Markytan delas in i delområden (250 x 250 meter) och varje delområde associeras med ett typekosystem med hjälp av tillgängliga kartor (gröna och gula kartan). Om flera ekosystem är tänkbara väljs det som förväntas ge högst doser. Om det finns en brunn (registrerad i brunnsregistret) i området väljs brunnsmodulen eftersom brunnen förväntas vara den dominerande transportvägen. För skogen där beräkningsmodell saknas används pessimistiskt torvmarksmodulen.

Aberg: Idag dominerar typekosystemet för skärgård och öppen kust. Skogsmark och torvmarker utgör också en stor andel av ekosystemen. Små delar av området är jordbruksmark medan sjöar saknas. Det finns idag tre brunnar i området med en medelkapacitet av 300 liter per timme.

Landhöjningen förväntas förändra situationen och om 2 000–5 000 år är sannolikt torvmarker det dominerande ekosystemet (se basscenariot).

Beberg: Skog är det dominerande ekosystemet följt av våtmarker och jordbruksområden. Sjöar och vattendrag finns också. Dessutom finns fyra brunnar med medelkapaciteten 1 000 liter per timme. Eftersom skogsmarken pessimistiskt ersätts av torvmarker i modelleringen kommer EDF-värdet för torv att dominera.

Landhöjningen och igenväxningen förväntas inte förändra dagens situation påtagligt.

Ceberg: Området genomkorsas av två större vattendrag. Vid ett av dessa förekommer mindre områden av odlad mark. Torvmarker och skog är de dominerande ekosystemen. Detta leder till att typekosystemet torv dominerar i området. Vattendrag och jordbruk förekommer också frekvent. Två brunnar med den genomsnittliga kapaciteten 500 liter per timme finns också.

Landhöjningen förväntas inte påverka fördelningen av dominerande ekosystem vid Ceberg.

9.10.4 Diskussion

Vilket acceptanskriterium?

Vid beräkningar av EDF-värden antas för typekosystemen torvmark, jordbruk och brunn att utsläpp av radionuklider till biosfären sprids inom ett lokalt område av ungefär samma storlek som de delområden som använts vid indelningen av biosfären på de tre platserna (250 x 250 meter). Inom detta område antas de boende utvinna all sin föda och hämta allt sitt dricksvatten.

Beräkningarna omfattar för åtminstone dessa tre typekosystem alltså endast de mest exponerade individerna inom en större region. Det acceptanskriterium som beräknings-

resultat bör jämföras mot då dessa EDF-värden används är således en risk av 10^{-5} , dvs en risk för de mest utsatta människorna i en population. Uttryckt i dos motsvarar denna risk $1,5 \cdot 10^{-4}$ Sv/år för en exponering som säkert inträffar.

För typekosystemen kust, sjö och rinnande vatten kan det i vissa fall vara stora populationer som exponeras vilket gör det rimligare att jämföra med risken 10^{-6} , vilket svarar mot dosen $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/år för en exponering som säkert inträffar.

Osäkerheter

Den använda metodiken att dela upp platserna i delområden gör att osäkerheterna i de ytnära ekosystemen kan separeras dels i frågan om vilket ekosystem som kommer att vara utströmningsområde, dels i osäkerheter i indata för beräkningsmodellerna för varje typekosystem.

De största osäkerheterna ligger i identifikationen av vilket typekosystem som kan bli aktuellt. En ökad förståelse för vilka ekosystem som kan vara rimliga och hur ytnära transport av radionuklider sker bör reducera osäkerheterna betydligt. En noggrann beskrivning av de ytnära ekosystemen vid framtida platsundersökningar kan bidra till att reducera osäkerheter kring beräknade EDF-värden. Biosfärens föränderlighet ger dock en fundamental begränsning i noggrannheten i biosfärsbeskrivningar som ska användas för att uppskatta radionuklidomsättning långt in i framtiden.

Beräkningsmodellerna för varje typekosystem behöver ses över. En modell behöver utvecklas för skogsmark. Troligen har skogsmark EDF-värden mellan jordbruksmark och torvmossor för de flesta radionuklider. Därför är klassificeringen till torvmark för skog troligtvis en överskattning av potentiella doser.

De högsta EDF-värdena fås för typekosystemen torvmark, brunn och jordbruksmark. I brunnsfallet är dricksvatten en dominant exponeringsväg för aktinider. För de biologiskt mer tillgängliga klor-, jod- och cesiumisotoperna ger konsumtion av födoämnen högre doser än konsumtion av vattnet för brunnsfallet.

Även sannolikheterna för de olika exponeringsvägarna i respektive ekosystem behöver övervägas. Torvmarken kräver t ex flera steg av bearbetning innan höga EDF-värden uppstår. Även i brunnsfallet krävs flera steg av mänskliga aktiviteter innan exponering sker. Jordbruksmark kan däremot vara en rimlig naturlig utveckling, liksom utströmning i ytvatten.

Sammantaget betyder detta att konsekvenser som uppskattats i SR 97 troligen överskattar riskerna betydligt. Med platsspecifika indata, bättre förståelse för dominerande ekosystem och reviderade beräkningsmodeller bör de flesta beräknade doserna reduceras.

Kommande arbete

- Utformningen av hela biosfärsmodellen behöver ses över i ljuset av de regleringar från SSI som nyligen trätt i kraft.
- Nuvarande biosfärsmodell behöver kompletteras med en beskrivning av ett skogsekosystem inför kommande säkerhetsanalyser.
- Metoder för klassificering av en potentiell förvarsplats i olika typekosystem behöver vidareutvecklas inför kommande platsundersökningar.

9.11 Beräkningar av radionuklidtransport

9.11.1 Inledning

Beräkningar av radionuklidtransport utgör en omfattande del av säkerhetsanalysen för ett djupförvar. Beräkningarna ska beskriva ett stort antal kopplade processer i förvaret, omgivande berg och biosfären. De kräver ett stort dataunderlag och resultaten blir relativt omfattande och komplexa. I detta avsnitt redovisas beräkningar av radionuklidtransport för kapseldefektscenariot. Syftet med beräkningarna är i korthet att:

- kvantitativt beskriva radionuklidtransport för detta scenario,
- illustrera betydelsen av osäkerheter i indata och visa vilka data som har störst inverkan på beräkningsresultaten,
- jämföra risken förvaret orsakar vid de tre platserna med givna acceptanskriterier,
- illustrera betydelsen av de enskilda barriärerna i förvarssystemet.

Först redovisas beräkningsmodellerna och tilltron till att modellerna korrekt fyller sitt syfte. Referens ges till alla data som ingår i analysen och därefter formuleras ett antal beräkningsfall med hänsyn till syftena ovan. Beräkningsresultaten redovisas liksom några analytiskt framräknade resultat. Avsnittet avslutas med en resultatdiskussion.

Beräkningsresultaten redovisas upp till en tidsperiod av en miljon år, i överensstämmelse med SKI:s förslag till föreskrifter. Resultaten bedöms dock olika för olika tidsperioder, i enlighet med SSI:s föreskrifter och diskussionen i avsnitt 2.2.1. Samtliga beräkningsfall redovisas mer utförligt i Lindgren och Lindström /1999/.

9.11.2 Beskrivning av transportmodellerna

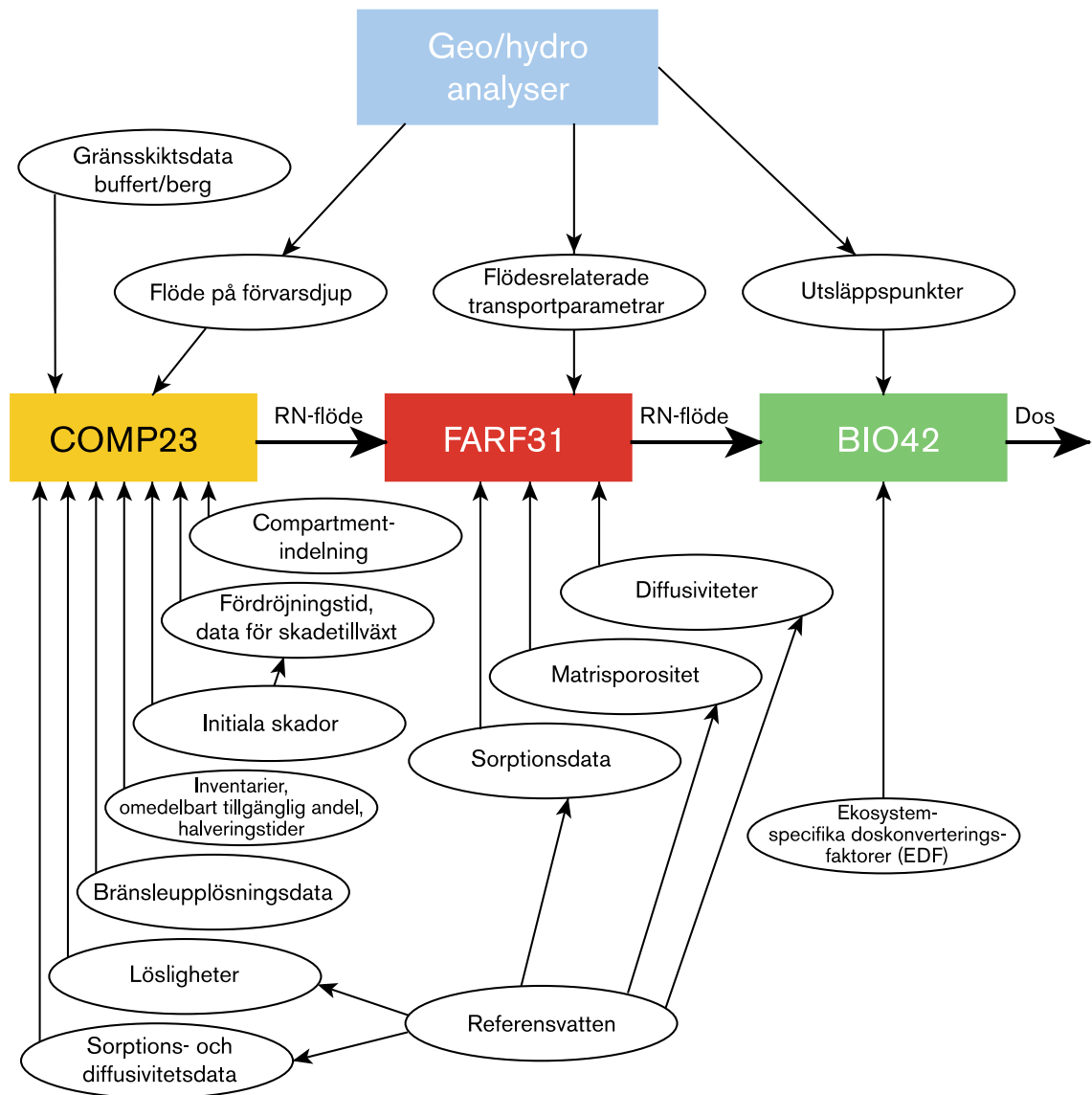
Radionuklidtransporten beräknas med närområdesmodellen COMP23, fjärrområdes-transportmodellen FARF31 och dosmodellen BIO42. Indata till modellerna kommer i sin tur från olika mer eller mindre komplexa modellberäkningar eller dataanalyser av olika förhållanden eller fenomen.

COMP23

Närområdesmodellen COMP23 är en s k compartmentmodell och bygger på NUCTRAN-modellen /Romero, 1995; Romero m fl, 1999/. COMP23 beräknar hur nuklider i en skadad kapsel frigörs från bränslet, hur dessa eventuellt fälls ut på grund av löslighetsbegränsningar, hur nukliderna diffunderar genom skadan hos kapseln, vidare genom bufferten och hur de längs olika vägar förs över till det strömmande grundvattnet i bergets sprickor, se figur 9-25.

För beräkningarna krävs information om radionuklidinventariet. Inventariet förändras genom radioaktivt sönderfall. För att kvantifiera detta behövs information om halveringstider och sönderfallskedjor.

För att frigörelse och transport ut ur kapseln ska vara möjlig krävs att det finns en skada i kapseln och att det finns en kontinuerlig vattenväg mellan skadan och bränslet. Skadans storlek begränsar utsläppet. Efter att en skada inträffat förlöper en s k karenstid innan den kontinuerliga vattenvägen utbildats. COMP23 behöver därmed dels information om skadans storlek och tillväxt, dels om karenstiden.



Figur 9-25. Modeller (rektanglar) och data (ellipser) för beräkning av radionuklidtransport.

De flesta radioaktiva ämnena i det använda bränslet förekommer i fast form i och på bränslet. Dessutom finns radionuklider i metalldelar och i bränslekapslingen. Om bränslet och metalldelar omges av vatten kan nuklider frigöras till vattnet. I COMP23 hanteras denna frigörelse med två mekanismer: omedelbar frigörelse av en viss fraktion *IRF* ("instant release fraction") av inventariet specifikt för varje nuklid och frigörelse av de nuklider som finns inne i urandioxid-matrisen med en konstant hastighet *R* som motsvarar hastigheten för upplösning/omvandling av urandioxid-matrisen.

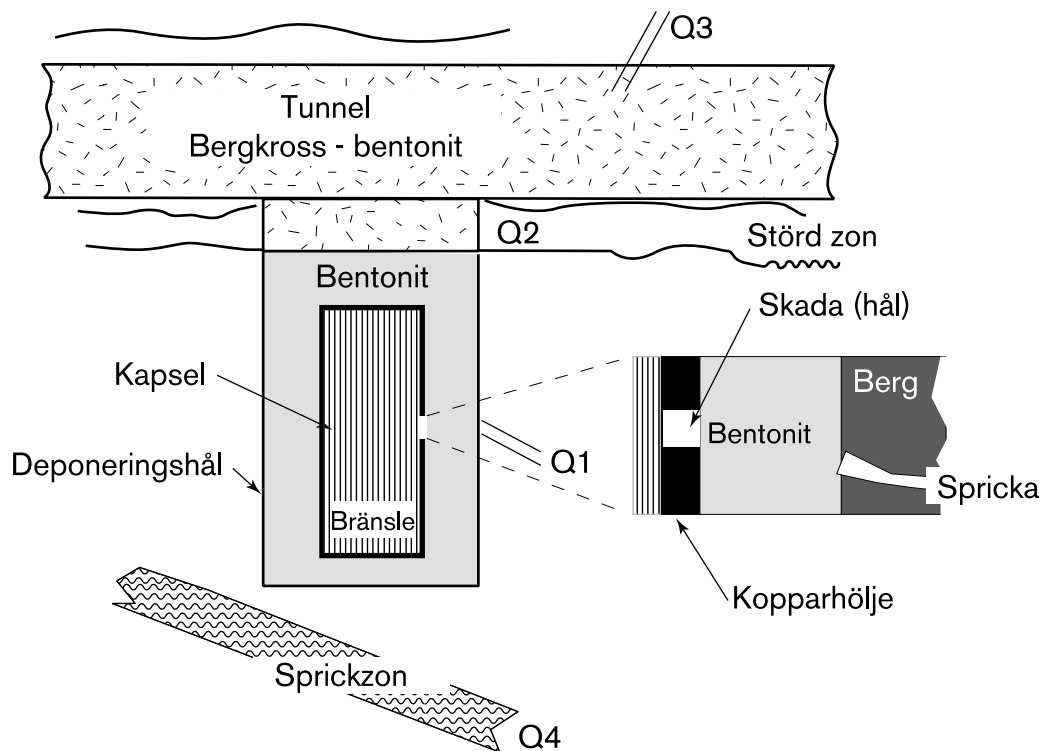
Koncentrationen av en viss radionuklid beror på den tillgängliga hålrumsvolymen i kapseln, hur mycket som frigjorts och hur mycket som transporterats ut ur kapseln. COMP23 kontrollerar att koncentrationen av de radioaktiva ämnena inte blir större än ämnets löslighet. Pessimistiskt antas att olika isotoper av samma ämne var för sig måste uppnå löslighetsbegränsningen innan den faller ut.

Transport genom bufferten beskrivs med processerna diffusion, sorption och kedjesönderfall. Inga löslighetsbegränsningar modelleras i bufferten. COMP23 använder elementspecifika värden för fördelningsfaktorer (K_d), effektiv diffusivitet (D_e) och porositet (ϵ).

Transporten genom bufferten ut till det strömmande grundvattnet i geosfären kan fortsätta via fyra olika vägar, figur 9-26:

1. direkt in i en spricka som skär deponeringshålet mitt för skadan i kapseln,
2. in i den störda zonen som antas finnas kring deponeringstunneln,
3. via tunnelns återfyllning och vidare in i en sprickzon som antas skära tunneln,
4. via diffusion genom berget in i en antagen sprickzon i berget.

För att beskriva denna transport behövs dels information om transportegenskaper (sorption och diffusion) för återfyllningen och för berget och dels om massöverföringen till det strömmande grundvattnet i berget. I COMP23 beskrivs massöverföringen med sk ekvivalenta flöden (Q_{eq}) för de olika transportvägarna (se avsnitt 9.10.2). Q_{eq} beror på geometrin (längden, vidden och porositeten) för kontakten med flödesvägen och på storleken av det specifika grundvattenflödet /se Moreno och Gylling, 1998/. Eftersom berget är heterogent varierar grundvattenströmning i rummet. De olika kapselpositionerna kommer därför att ha olika värden på Q_{eq} .



Figur 9-26. Schematisk illustration av de olika transportvägar (Q1–Q4) som behandlas i närområdesmodellen COMP23 /Moreno och Gylling, 1998/.

FARF31

Modellen FARF31 /Norman och Kjellbert, 1990/ används för att beräkna transport av de utsläppta radionukliderna genom berget. Modellen beräknar transporten längs den tänkta strömväg som beskrivs av en fiktiv partikel som följer med grundvattenströmningen genom berget. Eftersom berget är heterogent varierar grundvattenströmning i rummet. De olika kapselpositionerna kommer därför att vara kopplade till olika strömvägar med olika egenskaper.

Geosfärtransporten beskriver hur stor andel av utsläppet (Bq/år) från COMP23 som når biosfären. De olika partikelbanornas utsläppspunkter bestämmer också var utsläppet i biosfären sker.

FARF31 är endimensionell, hanterar advektion och dispersion längs strömningsvägen, matrisdiffusion kombinerat med sorption på bergmatrisen samt radioaktivt kedjesönderfall. Dispersionen beskrivs med en konstant dispersivitet och uttrycks som ett Peclet-tal. Fördröjningen i berget beror dels på strömningshastigheten i sprickan, som beskrivs med gångtiden t_w , dels på den så kallade F-faktorn som tar hänsyn till utbytet mellan nuklider i vattnet och i bergmatrisen. F-faktorn kan uttryckas som produkten av den advektiva gångtiden och flödesväta ytan per volym vatten i transportvägen ($t_w \cdot a_w$) men andra beskrivningar är också möjliga, se avsnitt 9.9.7 och Andersson m fl /1998/. För att beskriva matrisdiffusionen och sorptionen i bergets mikroporstruktur krävs information om matrisdiffusivitet (D_e), matrisporositet (ϵ), maximalt penetrationsdjup och sorptionsvärden (K_d) för de olika ämnena.

BIO42

Biosfärmodelleringen syftar till att beskriva omsättningen av eventuellt utsläppta radionuklider i biosfären för att kunna göra det möjligt att uppskatta radiologiska konsekvenser för potentiellt exponerade människor och för miljön. Den slutgiltiga dosberäkningen sker med modellen BIO42 som beräknar en dos genom att multiplicera utsläppet från geosfären (Bq/år), som beräknats med FARF31 med en "ekosystemspecifik dosomvandlingsfaktor" (EDF) (Sv/Bq). Dosomvandlingsfaktorn bestäms av vilken typ av "biosfärmodul" utsläppet sker till. Typ av modul kan antingen anges direkt eller bestämmas som en funktion av var utsläppet sker.

Den egentliga biosfärmodelleringen sker vid bestämningen av dosomvandlingsfaktorer för de olika modultyperna. De moduler som nu används är brunn, sjö, kust (hav), jordbruksmark och torv. Varje plats delas först in i typmoduler för olika ekosystem och för varje typmodul beräknas ekosystemspecifika dosomvandlingsfaktorer. Denna analys ligger dock utanför själva BIO42 modellen.

9.11.3 Tilltro till modellerna för grundvattenströmning och transport

Tilltron till att modellerna i säkerhetsanalysen med använda data korrekt beskriver relevanta fysikaliska processer, är viktig för tilltron till resultatet av modellberäkningarna. Modellerna för grundvattenströmning och radionuklidtransport används direkt för att kvantifiera förvarets säkerhet i utsläppsberäkningar och här blir frågan om tilltro, eller modellernas validitet, särskilt viktig.

Frågan om hur de modeller som används i säkerhetsanalysen ska kunna valideras har också analyserats och diskuterats i flera olika internationella sammanhang. I det så kallade INTRAVAL-projektet /NEA/SKI, 1996/ med deltagare från myndigheter och kärnavfallsorganisationer från hela världen, jämfördes bland annat nuklidtransportmodeller med

resultat från olika spår försök utförda i Sverige och i andra länder. Några definitiva slutsatser kunde dock inte dras eftersom det inte går att experimentellt helt efterlikna transport av sorberande radionuklider under naturliga grundvattenflöden. Modellerna förkastades inte, men jämförelsen kan inte helt tas till intäkt för att modellerna är riktiga.

SKI har tillsammans med den amerikanska kärnkraftmyndigheten US NRC (US Nuclear Regulatory Commission) publicerat ett sk "White Paper" om myndighetsperspektiv för modellvalidering inom kärnavfallsprogram /NRC/SKI, 1999/. Myndigheterna konstaterar att validering inte är något absolut utan något som måste bedömas. Validering innebär att bedöma fullständigheten i det vetenskapliga underlaget, att söka beskriva alla processer som har stor inverkan på resultatet, och att bedöma om modellerna är tillräckligt noggranna för sin avsedda användning. En sittande arbetsgrupp inom OECD Nuclear Energy Agency /NEA, 1999/ konstaterar att modeller används för beslut. Tilliten till modellen måste stå i paritet till beslutets vikt. Tillräcklig tilltro betyder inte att alla relevanta frågor behöver ha besvarats och lösts. Det räcker att visa att olösta frågor inte på ett avgörande sätt inverkar på det aktuella beslutet och att det finns goda förutsättningar att, om nödvändigt, lösa problemen vid senare beslut i utvecklandet av djupförvaret.

Transportmodellerna kan inte i detalj förutsäga precis hur mycket, när och var spridningen av radionuklider från en skadad kapsel kommer att ske. Så exakta förutsägelser är inte heller nödvändiga. Syftet med beräkningarna är i första hand att kontrollera att utsläpp och transport inte leder till konsekvenser som överskrider de gränser som sätts av acceptanskriterierna. Det är därför viktigt att modellerna inte underskattar utsläppen till biosfären, medan exakta förutsägelser om transportvägarnas läge eller när utsläpp kommer att ske blir mindre viktiga. Tilltro till en modellberäkning bygger på en bedömning av om alla relevanta processer och fenomen finns beskrivna, om den matematiska hanteringen är riktig och att modellens data stöds av resultat från olika experiment och fältundersökningar. Brister i detaljerad förståelse av en process kan hanteras genom att välja data och i övrigt förenkla beskrivningen av processen så att konsekvenserna (utsläppet och transporten) inte underskattas.

Vid modellering av grundvattenströmning eftersträvas större realism än vid den efterföljande modelleringen av radionuklidtransport. Anledningen är bl a att en modell för grundvattenströmning som kan förklara observerade förhållanden på platsen ger större tilltro till säkerhetsanalysen som helhet. För att man ska kunna ha tilltro till modeller för grundvattenströmning bör de därför kunna förklara observerade förhållanden. Strävan efter en modellering som säkert inte underskattar de säkerhetsmässiga konsekvenserna leder ändå till att vissa aspekter av också grundvattenmodelleringen hanteras pessimistiskt.

HYDRASTAR

Tilltron till att en modell för grundvattenströmning tillräckligt väl beskriver förhållandena på en plats beror av:

- tilltron till den matematiska hanteringen av strömningsekvationerna,
- tilltron till den metod som används för att omsätta indata till en tredimensionell hydraulisk beskrivning av berget i modellen,
- kvaliteten i hydrauliska indata till modellen.

De två första punkterna rubriceras som konceptuella osäkerheter, den sista rör data-osäkerheter. Materialet till redovisningen av tilltron nedan är till stor del hämtad från diskussionerna om osäkerheter kring hydromodelleringen i avsnitt 9.8.8.

Konceptuella osäkerheter

I HYDRASTAR beskrivs grundvattenströmning av Darcys lag och den hydrauliska konduktiviteten beskrivs som en kontinuerlig, rumsligt korrelerad stokastisk process. Den förra beskrivningen är väl underbyggd medan den senare kan diskuteras. På skalor relevanta för säkerhetsanalysens grundvattenmodellering är vattengenomsläppligheten i kristallint sprickigt berg icke-kontinuerlig; vissa partier av berget kan t ex vara nästan helt täta.

Synsättet att berget är icke-kontinuerligt har lett till formuleringen av diskreta spricknätverksmodeller, vilket stämmer bättre med en intuitiv bild av bergets egenskaper. AMP-studien, avsnitt 9.8.4, visar dock att båda synsätten leder till snarlika resultat för Aberg. Detta indikerar att effekterna av den konceptuella osäkerheten är begränsad. Modellering av fältförsök vid Aberg /Walker m fl, 1996/ indikerar att HYDRASTAR kan förklara observerade förhållanden på platsen. Också detta tyder på att HYDRASTARs konceptualisering är lämplig för dess syfte.

Densitetsdriven strömning försummas i HYDRASTAR. En studie för Beberg /Marsic och Hartley, 1999/ visar dock att randvillkor givna som densitetskompenserad tryckhöjd kan återskapa effekterna av densitetsdriven strömning tillräckligt väl.

En annan förenkling i HYDRASTAR-simuleringarna i SR 97 är att tidsvariationen på ränderna försummas. En studie för Aberg /Svensson, 1999/ visar dock att effekten av förenklingen är liten jämfört med övriga osäkerheter i modelleringen.

Dataosäkerheter; vattenförande strukturer

Också osäkerheter i data om platsens geologiska strukturer kan påverka bedömningen av tilltron till modellen. Större vattenförande strukturers existens, riktning, storlek och egenskaper kan vara kända med stor säkerhet inom vissa, väl undersökta bergvolym, medan osäkerheten för samma strukturer, och andra, kan vara stor i bergvolym som är mindre väl undersökta. Möjligheten att tolka fältdata påverkas också av geologins komplexitet. Den rumsliga variabiliteten är oftast stor inom såväl identifierade större sprickzoner som i bergmassan mellan zonerna.

En betydande osäkerhet ligger också i bestämningen av det sammanbundna nätverket av vattenförande strukturer. Sambandet mellan geologiskt tolkade strukturer och hydrauliska strukturer är inte entydigt.

Denna typ av osäkerheter hanteras i SR 97 genom att olika modellvarianter med olika antaganden om data och egenskaper analyseras. Även här är det övergripande resultatet att varianterna väl täcks in av det basfall de jämförs med och att därmed tilltron till modellen i detta avseende kan anses vara god.

Verifiering

För att man ska kunna ha tilltro till en modell måste den också vara verifierad, dvs den måste ha bevisats "räkna rätt". HYDRASTAR har verifierats i ett antal studier, se t ex Norman /1991/ samt Morris och Cliffe /1994/.

Slutsats

Baserat på diskussionen ovan görs bedömningen att tilltron till HYDRASTAR för användningen i SR 97 är god.

COMP23

Det har inte varit möjligt att testa hela närområdesmodellen COMP23 mot experimentella resultat. Modellen har dock använts för att beskriva utbredningen av en redoxfront vid den naturliga analogin Poços de Caldas /Romero, 1995/. Tilltron till modellen måste dock väsentligen bygga på tilltron till hur dess olika delprocesser valts, beskrivs och hur de kopplats samman.

De numeriska förenklingarna i COMP23 har verifierats bl a genom jämförelse med en mer generell numerisk modell /Romero, 1995; Lindgren och Widén, 1998/.

COMP23 hanterar alla de processer som identifierats i processbeskrivningen. Processbeskrivningen bygger, i sin tur, på många års analys av olika forskare och organisationer. Det bedöms inte troligt, att det finns helt nya, okända processer, som påverkar transportprocesserna i slutförvarets närområde, se diskussion i avsnitt 5.8. Osäkerheten gäller därmed snarare hur transportprocesserna beskrivs och vilka data som används.

En väsentlig del av tilltron till COMP23 bestäms av tilltron till beskrivningen av processer som bestämmer förutsättningarna för transporten. Detta har redan diskuterats i tidigare avsnitt.

- Inventariet varierar, men kan bestämmas med tillräcklig god precision (se avsnitt 6.2.4).
- Beskrivningen av bränsleupplösning och data bygger delvis på experimentella data, men vissa delar av modellen har ännu inte kunnat helt beläggas experimentellt (avsnitt 9.7).
- Beskrivningen av lösning/utfällning baseras dels på experimentella data och dels på analys av osäkerheter (avsnitt 9.7). Beskrivningen av den kemiska utvecklingen i kapsel (avsnitt 9.7) och i buffert (avsnitt 8.9) skulle dock kunna göras mer detaljerad. Beskrivningen av processen i COMP23, där lösligheter bara kontrolleras inne i kapseln och för varje isotop separat, är pessimistiskt förenklad.
- För skadans storlek och tillväxt finns betydande osäkerheter (se avsnitt 9.6) som hanteras genom att studera olika fall.
- Kunskapen om och data för kedjesönderfall är god och fullt tillräcklig för modelleringens syfte (se avsnitt 8.5).

Underlag för att beskriva tilltron till beskrivningen av transportprocesserna i COMP23 diskuteras i avsnitt 9.10.2.

- De stora osäkerheter som finns kring transporten i kapseln hanteras genom att i modellen anta ”omrörd tank”. Själva diffusionen genom skadan, och den begränsning av uttransporten som orsakas av en liten skada sker med väl kända matematiska samband. Osäkerheten gäller istället skadans form (se ovan).
- Experimentella data visar att bufferten är så tät att advektion kan försummas och därmed är diffusion den helt dominerande transportprocessen genom bufferten (avsnitt 8.7.3).
- Experiment i laboratorieskala ger försumbart små halter frigjorda kolloider (se Basscenariot avsnitt 8.9.3 och Processrapporten). Kolloidfrigörelse modelleras därför inte i COMP23.

- Det finns ett stort antal diffusions- och sorptionsförsök som utförts i bentonit och liknande leror, se Processrapporten. Tolkningen av data kan vara komplicerad och det finns olika teorier om detaljer av transportprocesserna. Osäkerheten kan dock hanteras genom val av data, se avsnitt 9.9.3.
- Massöverföringen buffert/berg styrs av kända processer (diffusion och advektion). Osäkerheterna gäller geometrin och grundvattenflödet. Osäkerheterna för dessa är relativt betydande, se avsnitt 9.8, men hanteras med variationsfall. Den stiliserade geometri som antas i COMP23 skulle kunna göras mer realistisk.

COMP23 med tillhörande data bedöms vara tillräckligt tillförlitlig för SR 97. Modellen och data kan förbättras och osäkerheterna kan sannolikt komma att reduceras. Inga sådana förändringar förväntas dock få avgörande inverkan på resultaten av transportberäkningarna.

FARF31

Transportmodeller som liknar FARF31 har använts för att beskriva olika spår försök. I Sverige har försök utförts t ex i Stripa gruva /Gnirk, 1993; Olsson och Gale, 1995/, i Finnsjön /Ahlbom m fl, 1992/ samt vid Äspölaboratoriet /Gustafson och Ström, 1995; Elert, 1999/. Liknande analyser har gjorts internationellt, till exempel inom ramen för INTRAVAL-projektet (se ovan). Transportprocesser som har stor inverkan för resultatet av spår försök, som olika dispersionsfenomen, har dock mindre betydelse för transport av långvariga utsläpp av sorberande radionuklider, medan spår försöken påverkas lite av matrisdiffusion och sorption, som har stor betydelse för nuklidtransporten. Jämförelserna kan dock inte användas som direkta bevis för att modellerna är tillämpliga för säkerhetsanalysens behov. Tilltron till FARF31 måste därför till stor del bygga på tilltron till hur dess olika delprocesser valts, beskrivs och kopplats samman.

Liksom för COMP23 hanterar FARF31 alla de relevanta processer som identifierats i processbeskrivningen. Inte heller för FARF31 finns det anledning att förvänta sig att det finns helt nya, okända processer, som påverkar transportprocesserna i geosfären. Osäkerheten gäller därmed snarare hur transportprocesserna beskrivs och vilka data som används.

Underlaget för att beskriva tilltron till de olika transportprocesser som finns i FARF31 diskuteras i avsnitt 9.10.2.

- Uppmätta kolloidhalter i granitiskt grundvatten motiverar att kolloidtransport försummas.
- Eftersom sorption är ett samlingsnamn på flera processer kan man hävda att den konceptuella förståelsen varierar. Det finns mycket experimentella data från laboratorieförsök, men processen är betydligt svårare att bestämma i fält. Givet samtliga osäkerheter väljer man i säkerhetsanalyser K_d -värden så att retentionsförmågan inte överskattas.
- Det finns vissa osäkerheter kring själva processen diffusion i bergmatrisen men dessa osäkerheter hanteras genom att välja data pessimistiskt. Bergmatrisens porositet är ett större frågetecken. Den är visad i flera laboratorieförsök, men är svårare att bestämma direkt i fält. Ytterligare teoretiska och experimentella studier av betydelsen av en varierande matrisporositet kan vara befogad.

- Advektionen och överföringen mellan strömmande grundvatten och bergmatrisen är behäftade med relativt stora osäkerheter. Dels är själva grundvattenströmningen heterogen och osäker (se avsnitt 9.8), dels finns osäkerheter kring geometrin i kontakten mellan flödesväg och berg. Den geometriska beskrivningen i FARF31 ("flödesvätt yta") och migration längs strömvägar utan omblandning är geometriskt förenklad. Osäkerheten i flöde hanteras genom att studera olika modeller och olika varianter (se avsnitt 9.8) och osäkerheten i övrig geometri hanteras genom pessimistiska val av data.

FARF31 med tillhörande data bedöms vara tillräckligt tillförlitlig för SR 97. Modellen och data kan förbättras och osäkerheterna kan sannolikt komma att reduceras. Det finns, framförallt beträffande hanteringen av grundvattenflödet och dess geometriska fördelning i berget, potential till förbättringar som skulle kunna leda till mindre pessimistiska uppskattningar av geosfärens fördröjande förmåga.

Biosfärmodeller

Osäkerheter i biosfärmodelleringen diskuteras i avsnitt 9.9 samt i Bergström m fl /1999/.

Biosfären är i jämförelse med förvarssystemet betydligt mer komplex och föränderlig, och biosfärmodellerna innehåller betydande förenklingar av mekanismerna för omsättningen i ekosystemen.

För många radionuklider finns empiriskt underlag för överföringsfaktorerna i form av data från olyckor eller provsprängningar där överföringen av radionuklider uppmätts. Dessa data är dock resultat av den totala effekten av olika processer som påverkar radionuklidtransporten och det är svårt att urskilja betydelsen av enskilda processer. Detta gäller i synnerhet när data kommer från situationer med en kortvarig luftdeponering eller utsläpp i ytvatten, medan källan för radionuklider från ett djupförvar kommer att vara grundvatten under långa tidsperioder. Därför behöver överföringsfaktorerna delas upp i generella mekanismer (t ex födoupptag) och exponeringsspecifika mekanismer (t ex överföring vatten-jord) för att kunna användas i andra exponeringssituationer.

Numeriska resultat i internationella valideringsstudier har legat inom några storleksordningar från uppmätta värden och oftast överskattat dessa /BIOMOVs, 1993; BIOMOVs II, 1996; IAEA, 1996/. I allmänhet har de modellkoncept och verktyg som SKB använder givit goda resultat i dessa internationella jämförelser.

I beräkningen av EDF-värden för säkerhetsanalysen görs pessimistiska antaganden om spridningen av radionuklider i biosfären och om människors vanor och födointag.

Tilltron är därför god till att de beräknade EDF-värdena inte underskattar doser till människor trots att mekanismerna i en del ekosystem är bristfälligt beskrivna.

9.11.4 Referens till data som används för att analysera radionuklidtransporten

För att bestämma lämpliga indata till transportmodellerna behövs information från många ämnesområden. Data har valts efter sammanställning och analys av en stor mängd olika underlagsarbeten, se Datarapporten.

Bilaga 2 redovisar samtliga indata till transportmodellerna, som använts i kapseldefektscenariot. Tabell 9-3 visar översiktligt datatillgången med referens till det textavsnitt där valet av data diskuteras. Indata till modellerna anges dels som rimliga värden, dels (oftast)

som försvarbara pessimistiska uppskattningar. I vissa fall anges även beräknade statistiska fördelningar för indata, men i regel preciseras inte osäkerheten mer än till intervallet mellan bästa uppskattning och pessimistiska värden. Vissa data beror på de radioaktiva ämnets kemiska (speciering) och/eller radioaktiva egenskaper och blir därför ämnes- eller nuklidspecifika. En del data beror på platsspecifika förhållanden och blir därför olika för Aberg, Beberg respektive Ceberg.

Vid valet av data är det också nödvändigt att ta hänsyn till om olika parametrar är eller kan vara korrelerade. Speciellt de grundvattenkemiska förhållandena och grundvattenströmningen styr värdet av en eller flera av de grupper av indata som direkt används i modellerna, se tabell 9-3. Genom att ta hänsyn till korrelationer kan också orimliga kombinationer av parametervärden undvikas.

Tabell 9-3. Tillgängliga data för transportmodellerna. (R = rimliga data, P = pessimistiska data, F = beräknad fördelning, E = element/nuklidspecifika data, S = platsspecifika data).

Parameter	R	P	F	E	S	Korrelation med andra data	Avsnitt
Närområde							
Inventarium	X			X			6.2.4
IRF	X	X		X			9.7.7
Bränsleupplösnings-hastighet	X						9.7.7
Antal defekter	X	X					9.2.2
Defektstorlek	X						9.2.2
Skadetillväxt	X	X				Karenstid	9.6.7
Karenstid	X	X				Skadetillväxt	9.6.7
Lösligheter	X	X		X	X	Grundvattensammansättning	9.7.6
Sorption i bentonit	X	X		X	X	Grundvattensammansättning	9.9.3
Diffusivitet i bentonit	X			X	X	Grundvattensammansättning	9.9.3
Porositet i bentonit	X			X	X	Grundvattensammansättning	9.9.3
Återfyllning	X			X	X	Grundvattensammansättning	9.9.3
Specifikt grundvattenflöde på förvarsdjup	X	X	X		X	Bestäms av grundvattenmodell (viss korrelation till gångtid)	9.8 och 9.9.7
Q_{eq} relaterade parametrar (q_i , ϵ_i)	X	X				q_i är multiplar av q_0	9.9.4
Geosfär							
Matrisporositet	X			X	X	Grundvattensammansättning	9.9.5
Matrisdiffusivitet	X	X		X	X	Grundvattensammansättning	9.9.5
Sorption	X	X		X	X	Grundvattensammansättning	9.9.6
Advektiv gångtid, t_w	X	X	X		X	Bestäms av grundvattenmodell (viss korrelation till specifikt flöde)	9.8 och 9.9.7
Flödesvätt yta per volym vatten, a_w	X	X			X	Produkten $a_w t_w$ beror inte av flödesporositet	9.9.7
Maximalt penetrationsdjup	X	X			X		9.9.5
Peclets tal	X	X					9.9.7
Biosfär							
Val av modul	X	X			X	Utsläppspunkter bestäms av grundvattenmodell	9.10.3
EDF för vald modul	X	X		X	X		9.10.3

9.11.5 Val av beräkningsfall

Enligt avsnitt 9.11.1 är syftet med radionuklidtransportberäkningarna att:

- kvantitativt beskriva radionuklidtransport för detta scenario,
- illustrera betydelsen av osäkerheter i indata och visa vilka data som har störst inverkan på beräkningsresultaten,
- jämföra risken förvaret orsakar vid de tre platserna med givna acceptanskriterier,
- illustrera betydelsen av de enskilda barriärerna i förvarssystemet.

Baserat på detta formuleras ett antal beräkningsfall.

Rimliga fall

En utgångspunkt för att kvantifiera funktionen hos ett djupförvar på de tre platserna är ett fall där rimliga värden väljs för alla ingående data. Som framgått är även dessa ofta försiktigt valda och även i de "rimliga" fallen överskattas därför troligen konsekvenserna.

Osäkerhetsanalyser

Eftersom alla data är behäftade med osäkerheter måste det rimliga beräkningsfallet kompletteras med fall som illustrerar betydelsen av osäkerheterna.

Därför beräknas också fall där grupper av parametrar relaterade till i tur och ordning:

- 1) kapselskador,
- 2) bränslet,
- 3) buffert- och återfyllningsmaterialet,
- 4) sprick- och flödesförhållanden kring deponeringshålet,
- 5) kemiska förhållanden i geosfären,
- 6) sprick- och flödesförhållanden i geosfären,
- 7) biosfären,

väljs pessimistiskt medan alla övriga data ges rimliga värden.

Riskberäkningar

Acceptanskriteriet för förvaret är ett riskmått, dvs inte bara konsekvenser av utan också sannolikheter för olika konsekvenser måste uppskattas. Därför genomförs också enkla probabilistiska beräkningar för de tre förvarsplatserna.

Specialfall

Dessutom redovisas ett antal speciella beräkningsfall, formulerade för att illustrera extrema antaganden som att bränslet omedelbart är upplöst, att kapseln utesluts etc.

9.11.6 Vad händer i transportmodellerna?

Transportmodellerna är byggda för att säkert inte underskatta de utsläpp som beräknas. Modellerna ger därför en förenklad och pessimistisk bild av utvecklingen. Här följer en kortfattad beskrivning av det förlopp som kvantifieras i transportmodellerna, som en inledning till presentationen av resultaten av beräkningsfallen.

1. Innan en kontinuerlig vattenväg utbildats mellan bränslet och skadan i kapselns kopparhölje sker inga utsläpp från kapseln. Det radioaktiva sönderfallet gör att radionuklidinnehållet i bränslet minskar och att den samlade farligheten avtar.
2. I samma ögonblick en kontinuerlig vattenväg utbildats löses den omedelbart tillgängliga andelen av inventariet i vattnet i kapselns hålrum. Om löslighetsgränsen uppnås stiger inte koncentrationen av den lösta nukliden i vattnet ytterligare. De nuklider som lösts i vattnet börjar diffundera ut ur kapseln.

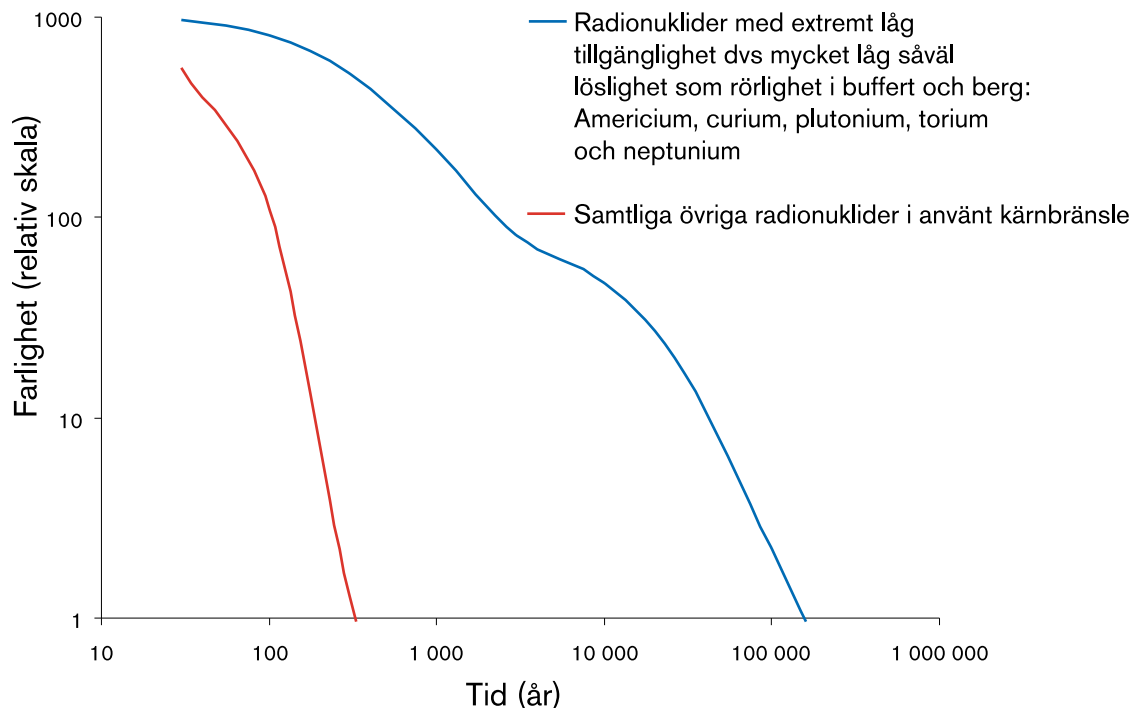
För nuklider som ligger inbäddade i bränslet bestäms frisättningstakten av bränsleupplösningshastigheten. Även här begränsar nuklidernas lösligheter den koncentration som kan uppkomma i vattnet.

3. Nukliderna sorberas med varierande effektivitet i bufferten och diffusions- och sorptionsegenskaperna avgör tiden för diffusion genom bufferten. Om denna är kortare än eller jämförbar med halveringstiden tränger nukliden vidare ut i berget.
4. I berget avgör nuklidens sorptionsegenskaper tillsammans med bergets transportegenskaper (flödet och sprickstrukturen) tiden för transport genom berget till biosfären. På samma sätt som i bufferten avgör halveringstiden om nukliden hinner tränga genom geosfären innan den sönderfaller.
5. I biosfären ger nukliden upphov till en dos som beror av dess inneboende hälsofarlighet och av hur den omsätts i den biosfärstyp den släpps ut till.

Generellt gäller att nuklider som har en relativt sett hög omedelbart tillgänglig andel också tenderar att vara lösliga och relativt lätttrörliga i såväl buffert som berg. För I-129 är t ex flera procent av inventariet omedelbart tillgängligt, jod har mycket hög löslighet och sorberas inte i vare sig buffert eller berg. Plutoniumisotoper å andra sidan, ligger helt inbäddade i bränslematrisen, har en låg löslighet och sorberas starkt i både buffert och berg. Isotoper av uran, torium och americium har liknande egenskaper som plutonium. Det är också, i mycket generella termer, så att farligheten är mindre för de lätttrörliga nukliderna.

Figur 9-27 illustrerar översiktligt att farligheten på lång sikt domineras av nuklider som både är svårlösliga och har låg rörlighet i buffert och berg.

Beskrivningen ovan ger en grov bild av händelseutveckling och konsekvenser. De kvantitativa detaljerna bestäms av de indata som väljs i ett beräkningsfall. Den följande redovisningen av olika beräkningsfall är fokuserad på de nuklider som ger störst bidrag till utsläppen. Många av de farligaste nukliderna som isotoper av americium, plutonium och torium syns inte i redovisningarna, eftersom förvarets fördröjande förmåga är mycket god för dessa.



Figur 9-27. Farlighet för använt kärnbränsle uppdelad i nuklider med extremt låg tillgänglighet och övriga /Hedin, 1997/.

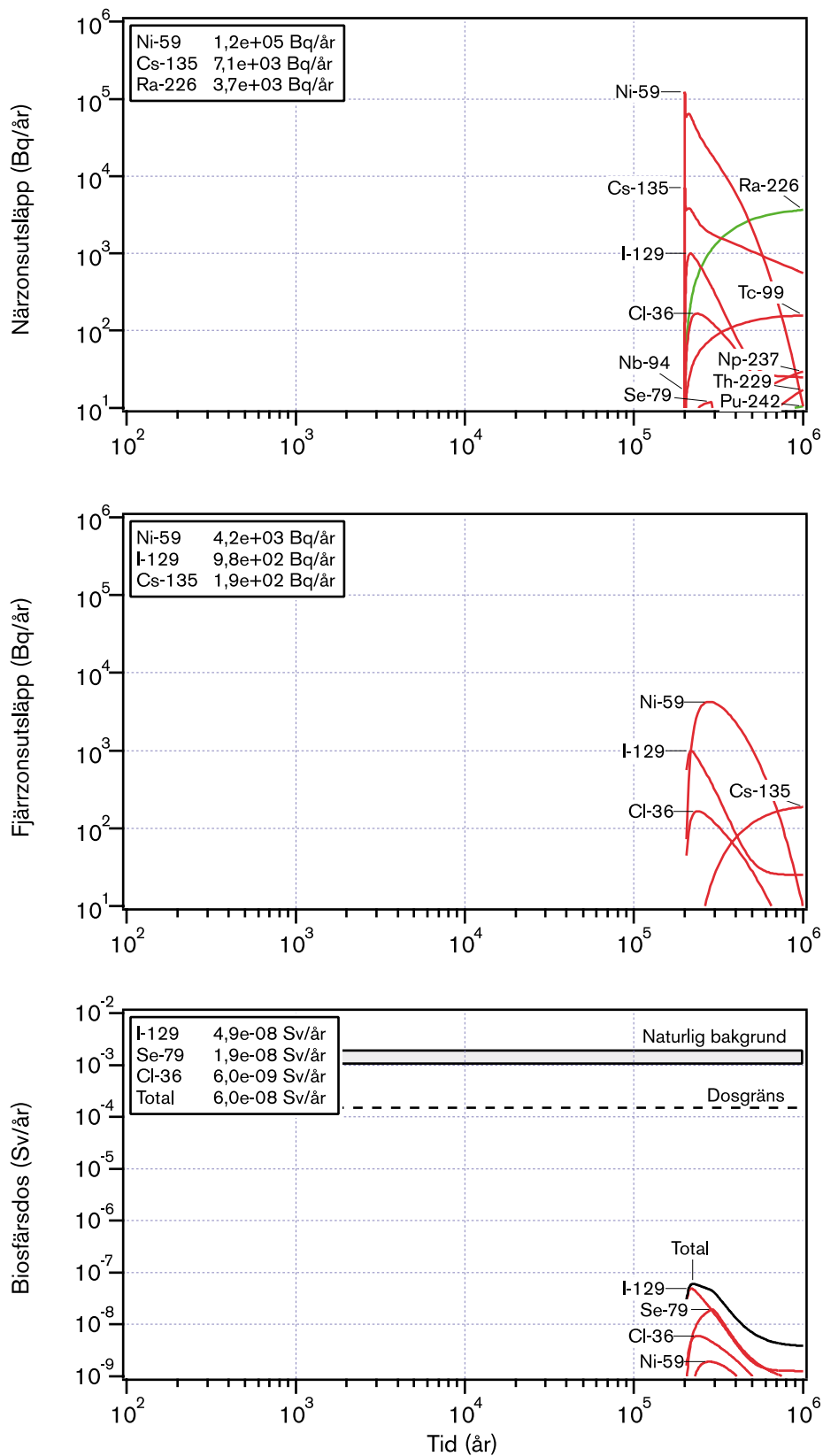
9.11.7 Rimliga fall för Aberg, Beberg och Ceberg

Samtliga beräkningsfall redovisas mer utförligt i Lindgren och Lindström /1999/. Figur 9-28 visar resultaten från beräkningarna för Aberg där alla data valts som rimliga. Beräkningen gäller därmed **en** kapsel, med en initial skada som efter 200 000 år vuxit så att en kontinuerlig vattenväg till bränslet utbildats. Därmed startar också bränsleupplösning och radionuklidtransport efter 200 000 år. Många radionuklider har efter denna tid sönderfallit fullständigt. Endast mycket långlivade nuklider, och i första hand de som har en omedelbart tillgänglig fraktion släpps ut. Den skadade kapseln är placerad i ett deponeringshål med medianvärden för flöden och advektiva gångtider.

Biosfären är en torvmosse med rimliga EDF-värden. Med dagens flödessituation vid Aberg förväntas de flesta utsläppen till Östersjön. Den pågående strandlinjeförskjutningen gör att utsläppen från några tusen år in i framtiden kan förväntas till landområden. Torvmossen är den "landmodul" som beräknas ge de högsta doserna, samtidigt som den inte kan betraktas som osannolik. Därför har denna valts som det rimliga fallet på sikt för Aberg.

Utsläppen från närområdet domineras av nickel-59, en radionuklid med halveringstiden 75 000 år som finns i bränslets strukturdelar. Dessa tänks vara helt upplösta av korrosion och därmed blir hela inventariet av Ni-59 tillgängligt för transport.

Den andel av de lätttrörliga fissionsprodukterna I-129 och Cs-135 som finns på bränslekutsarnas yta frigörs omedelbart från bränslet och diffunderar relativt snabbt genom bufferten.



Figur 9-28. Utsläpp från närzon och fjärrzon samt doser i biosfären som funktion av tid i Aberg. Alla data valda som rimliga. De inlagda rutorna visar maximala utsläpp och doser för dominerande nuklider.

På längre sikt domineras utsläppen från närområdet av radium-226, en naturligt förekommande radionuklid som bildas genom kedjesönderfall av uran-238 i bränslematrisen.

Av de fyra möjliga utsläppsvägarna till berget, figur 9-26, dominerar vägarna Q1 och Q2, dvs bergssprickor som antas finnas mitt för skadan i kapseln respektive den uppspruckna zonen kring tunnelns periferi som uppstår vid tunnelsprängningen.

Utsläppen från geosfären domineras också av Ni-59 vid Aberg. Det maximala utsläppet från geosfären är omkring 1/30 av maxutsläppet från närområdet. För I-129 och Cl-36, som också bidrar till geosfärsutsläppet, tränger hela utsläppet från närzonen igenom, redan i det rimliga fallet. Ra-226, med halveringstiden 1 600 år sönderfaller nästan fullständigt i geosfären i det rimliga fallet.

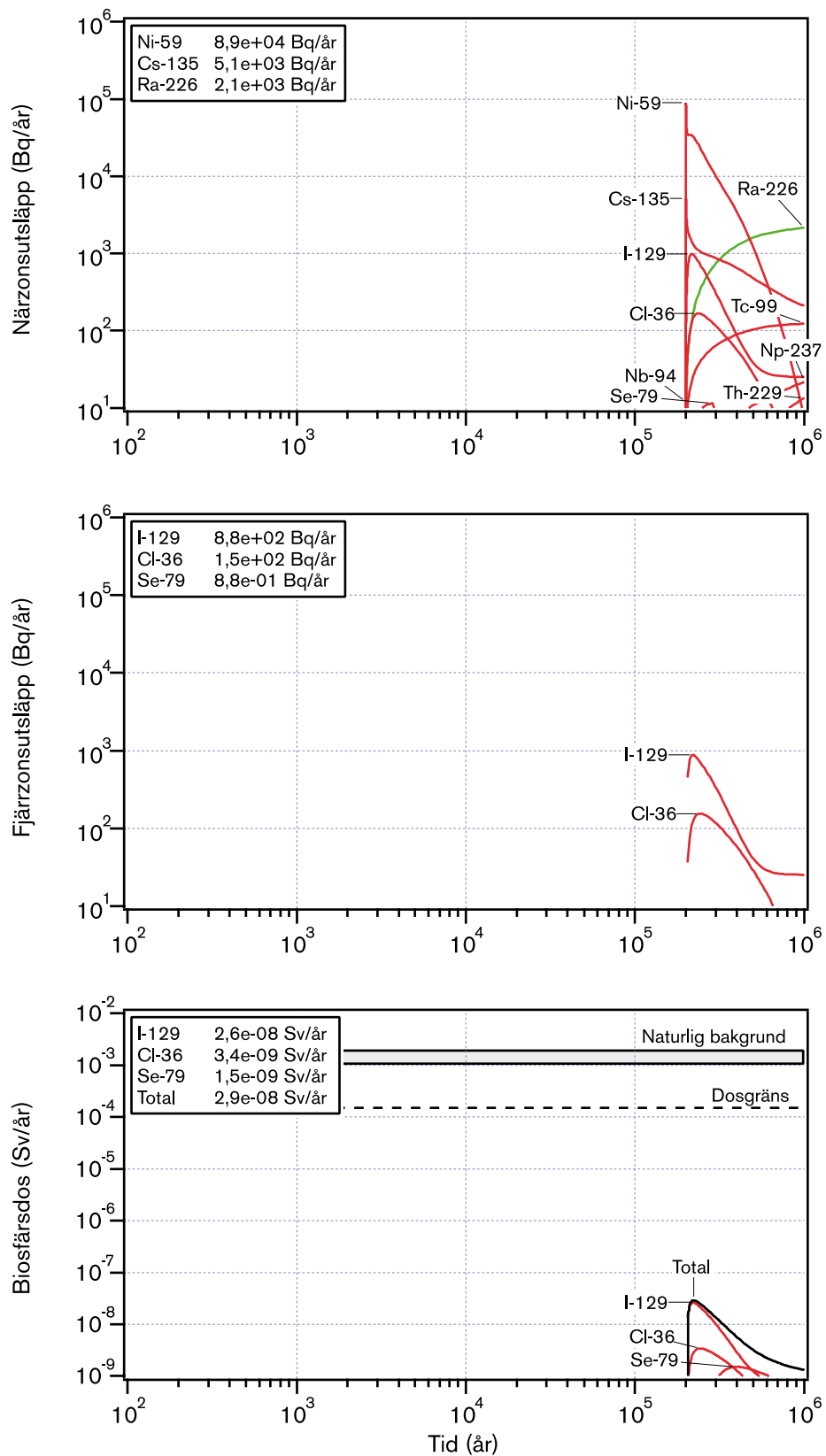
Kurvorna som visar biosfärsdos för respektive nuklid har samma form som utsläppskurvorna från geosfären. Den relativa betydelsen av olika nuklider är däremot en annan i biosfärskurvorna som fås genom att multiplicera geosfärskurvorna med nuklidspecifika EDF-faktorer. Biosfärsdosen vid Aberg domineras av I-129 och Se-79.

För alla tider ligger doserna långt under doser från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige.

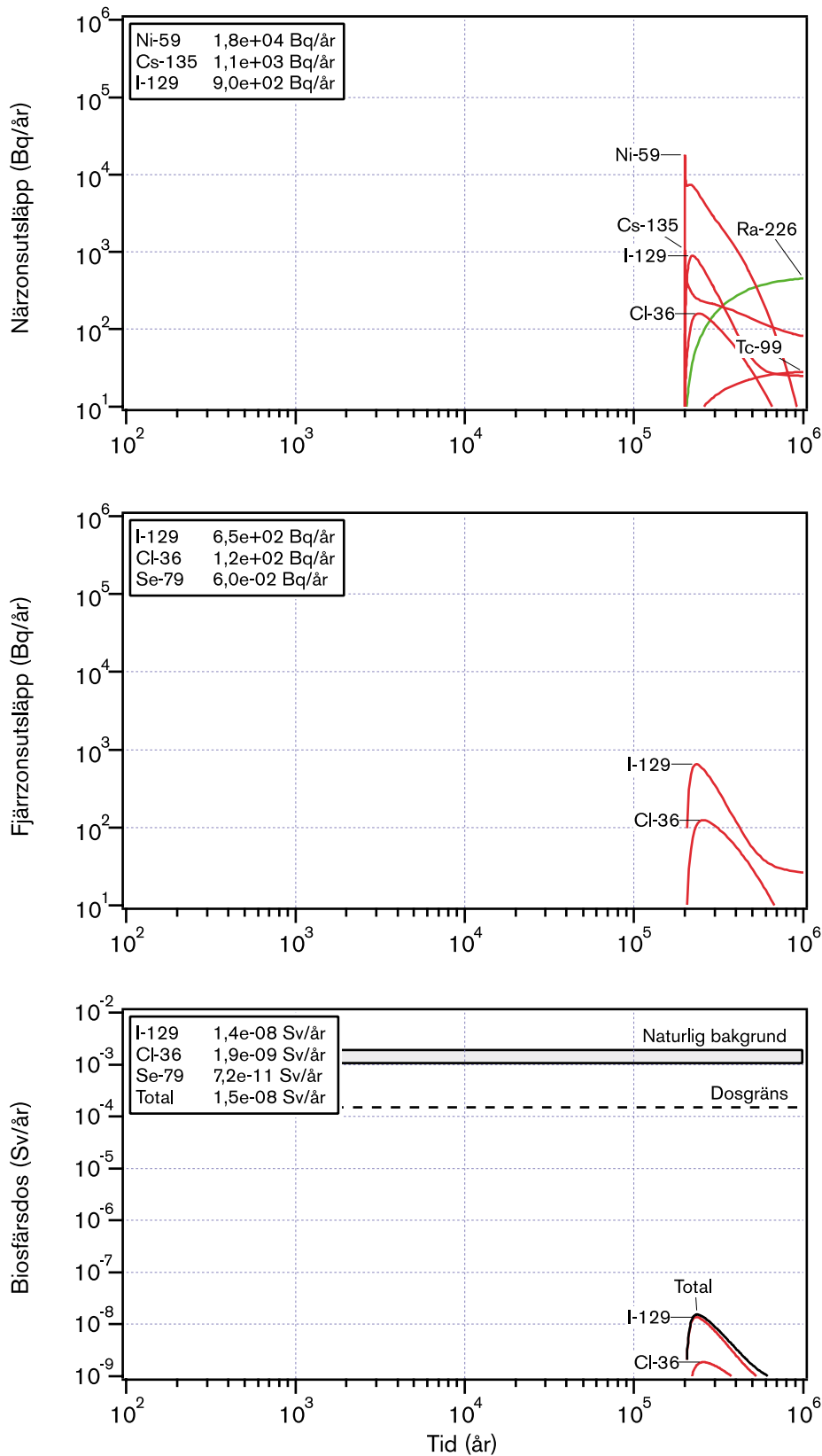
I biosfärfigurerna visas också en dosgräns om 0,15 mSv/år. Det är den dos som svarar mot risken 10^{-5} /år om exponeringen säkert inträffar. 10^{-5} /år är den riskgräns från SSI som SKB tolkat som den relevanta att använda för bl a brunns- och torvmodulerna i SR 97, se avsnitt 9.10.4.

Motsvarande fall för Beberg, figur 9-29, och Ceberg, figur 9-30, är mycket likartade, särskild för närzonsutsläppen. Geosfärens retentionsegenskaper för bl a Ni-59 och Cs-135 är bättre i Beberg och Ceberg. Här domineras geosfärsutsläppen av de lätttrörliga nukliderna I-129 och Cl-36 där liksom i Aberg nästan hela närzonsutsläppet tränger igenom geosfären.

Doskurvorna (torvmosse även i Beberg och Ceberg) blir likartade på samtliga platser eftersom I-129 dominerar.



Figur 9-29. Rimligt fall för Beberg.



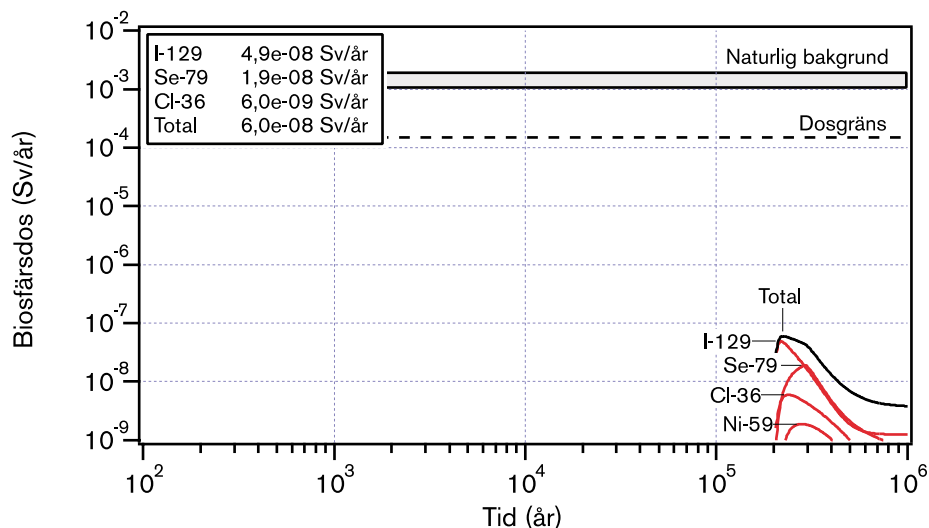
Figur 9-30. Rimligt fall för Ceberg.

9.11.8 Osäkerhetsanalys

Alla indata till radionuklidtransportberäkningarna är behäftade med osäkerheter. Som tidigare beskrivits har osäkerheter kvantifierats genom att förutom rimliga värden, också bestämma pessimistiska värden för nästan alla indata. För att analysera inverkan av dataosäkerheter på beräkningsresultaten beräknas fall där data relaterade till olika delar av förvaret systematiskt ges pessimistiska värden.

Arbetet med att bestämma rimliga och pessimistiska data är mycket omfattande och beskrivs utförligt i Datarapporten. Delar av arbetet finns sammanfattade i tidigare avsnitt under rubrikerna "Data till beräkningar av radionuklidtransport" samt i bilaga 1. I de få fall där statistiska fördelningar finns tillgängliga som underlag för dataval har pessimistiska data valts som 95-percentilen, dvs värdet för vilket 95 procent av utfallen i underliggande beräkningar gav ett mer gynnsamt resultat.

I det följande visas effekterna av att använda olika kombinationer av rimliga och pessimistiska data, utan att upprepa motiven till datavalen. Endast doser i biosfären (torvekosystemet) presenteras för dessa fall. Först följer en detaljerad genomgång för Aberg kompletterad med ett par viktiga fall för de andra platserna, följt av en sammanfattning för alla platserna. Som utgångspunkt för diskussionen visas åter biosfärsdoser för allt igenom rimliga data vid Aberg i figur 9-31.



Figur 9-31. Doser i biosfären som funktion av tid i Aberg. Alla data valda som rimliga. De inlagda rutorna visar maximala utsläpp och doser för dominerande nuklider. Dosgränsen 0,15 mSv/år svarar mot risken 10^{-5} /år, tolkad som tillämplig för de maximalt belastade individer vilkas exponering simuleras i biosfärsmodellerna för torv.

Kapselrelaterade data

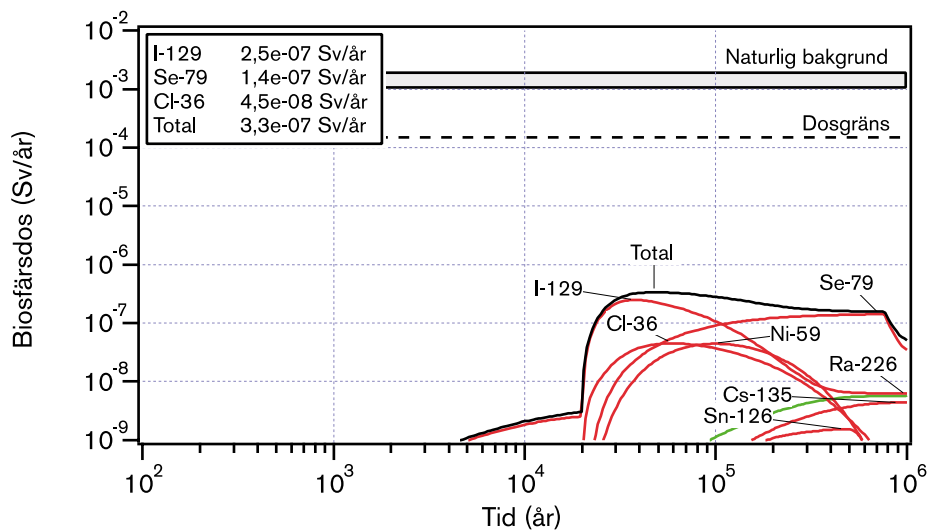
Figur 9-32 visar doser i biosfären som funktion av tid med pessimistiska data för kapselskador och i övrigt rimliga data vid Aberg.

I detta fall antas pessimistiskt fem kapslar vara initialt skadade mot en enda i det rimliga fallet. Den initiala kapselskadan ger upphov till en kontinuerlig vattenväg till bränslet redan efter 300 år och skadan antas ha vuxit så att kopparkapseln ger ett mycket begränsat transportmotstånd efter 20 000 år. I det rimliga fallet utbildas en kontinuerlig vattenväg först efter 200 000 år, då också skadan antas ha vuxit så att kapselmotståndet är litet.

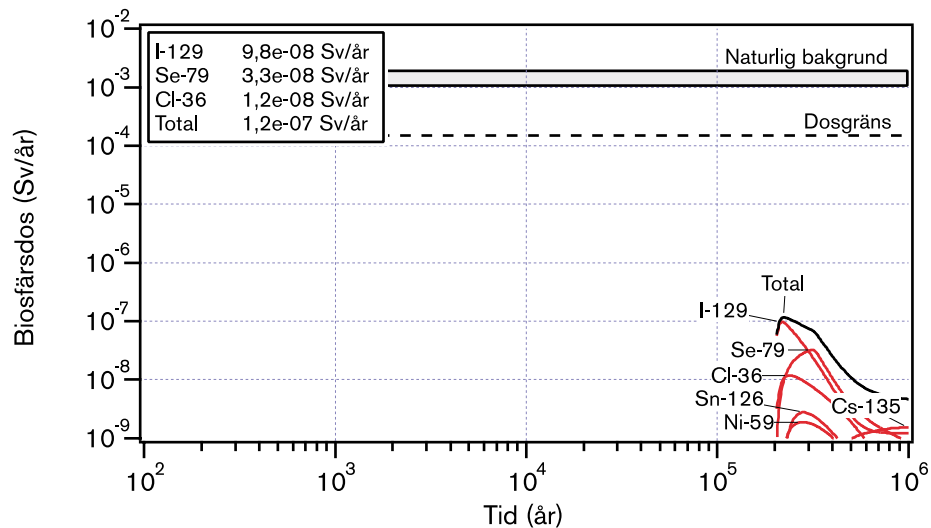
För intervallet 300 år till 20 000 år är skadan liten (1 mm^2) och begränsar kraftigt utsläppen.

Även i fallet med pessimistiska data för kapselskador domineras doserna i biosfären av långlivade, icke sorberande nuklider och doserna ligger långt under gränsvärdena. Ökningen i maximal dos jämfört med det rimliga fallet kommer nästan helt av att antalet skadade kapslar ökat från en till fem. De långlivade nukliderna hinner inte sönderfalla nämnvärt mellan 20 000 och 200 000 år och det spelar därför mindre roll för den maximala dosen när den större skadan uppkommer.

Ett extremt och orealistiskt fall där kapseln har ett stort hål initialt redovisas i avsnitt 9.11.10.



Figur 9-32. Pessimistiska data för antal skadade kapslar, karenstid och skadetillväxt för Aberg.



Figur 9-33. Pessimistiska data för omedelbart tillgänglig fraktion och lösligheter för Aberg.

Bränslerelaterade data

Effekterna av att ansätta pessimistiska lösligheter och värden för den omedelbart tillgängliga fraktionen visas i figur 9-33.

Skillnaden mot det allt igenom rimliga fallet är mycket små. De högre värdena för de omedelbart tillgängliga fraktionerna av I-129 och Cl-36, båda dubbelt så höga som för det rimliga fallet, påverkar resultaten i figuren.

Förändringarna i lösligheter mellan rimliga och pessimistiska värden slår inte genom i resultatet annat än för Se-79. De flesta svårslösliga nuklider som isotoper av plutonium, americium och torium ligger helt inbäddade i bränslematrisen. Huruvida löslighetsgränsen uppnås för sådana nuklider bestäms av bränsleupplösningshastigheten samt de nuklidspecifika lösligheterna och inventarierna. Bränsleupplösningshastigheten är för låg för att löslighetsgränserna ska nås ens i det rimliga fallet för de flesta nuklider. En förändring till pessimistiska lösligheter påverkar därför inte resultatet. Utsläppen från närområdet av aktinider som uran, plutonium och torium ökar, men är fortfarande mycket små.

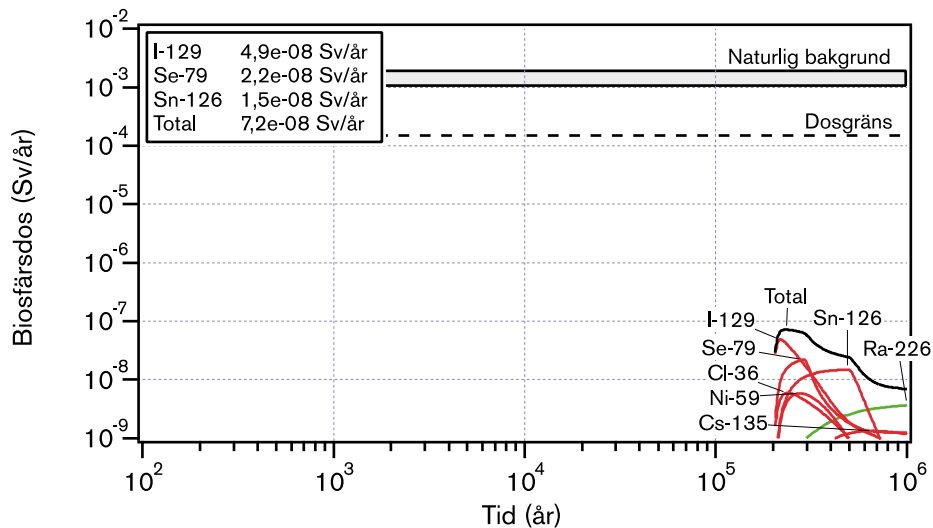
Två extrema och orealistiska variationer med omedelbar bränsleupplösning respektive oändliga lösligheter redovisas i 9.11.10.

Sorptionsdata i buffert och återfyllning

Effekten av pessimistiskt valda sorptionsdata för buffert och återfyllning illustreras i figur 9-34.

Nuklider som inte sorberas i bufferten, t ex I-129 och Cl-36 påverkas inte. Utsläppen av sorberande nuklider, som Ni-59, Sn-126, Ra-226 ökar men I-129 dominerar fortfarande totaldosen. Förändringarna i sorption i återfyllningen har försumbar inverkan på resultaten.

I avsnitt 9.11.10 visas ett extremt och orealistiskt fall där buffertens diffusionsmotstånd försummas.



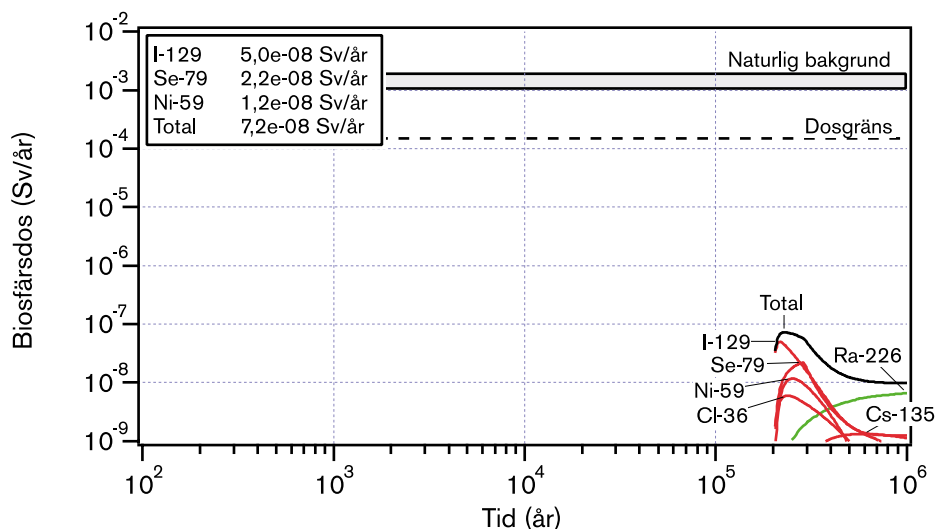
Figur 9-34. Pessimistiska sorptionsdata i buffert och återfyllning för Aberg.

Data relaterade till gränsskiktet mellan buffert och berg

Transporten av radionuklider över gränsskiktet mellan buffert och berg bestäms av det specifika grundvattenflödet i närområdet och egenskaperna hos de sprickor/sprickzoner som står i kontakt med buffert/återfyllning, se avsnitt 9.9.4. Figur 9-35 visar effekten av att använda pessimistiska värden för dessa data. I stället för medianvärdet för flödet, $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$, från basfallet i hydromodelleringen, väljs pessimistiskt 95-percentilen, dvs $10^{-1} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$.

Det specifika flödet och egenskaper hos sprickorna i närområdet bestämmer tillsammans vilken kapacitet berget har att transportera bort nuklider från buffert och återfyllning.

Om kapaciteten, som uttrycks som ett nuklidspecifikt transportmotstånd, är stor blir kapselskadans storlek eller buffertens transportmotstånd styrande för den totala transporten genom närområdet. Om gränsskiktets transportmotstånd är stort kan denna utgöra den begränsande faktorn.



Figur 9-35. Pessimistiska data för transport mellan buffert och berg för Aberg.

Med alla data rimliga vid Aberg blir gränsskiktet begränsande för många nuklider. I-129 och Cl-36 utgör undantag där transportmotståndet i bufferten dominerar. Med pessimistiska data för gränsskiktet blir detta inte begränsande för någon nuklid. Effekten illustreras i figur 9-35. I-129 och Cl-36 är oförändrade jämfört med det rimliga fallet medan utsläppen av t ex Ni-59, Cs-135 och Ra-226 ökat när pessimistiska data valts för gränsskiktets egenskaper.

Slutligen bör det noteras att spannet mellan rimliga och pessimistiska data för det specifika vattenflödet återspeglar en verklig variabilitet inom en plats.

Kemiska transportdata i geosfären

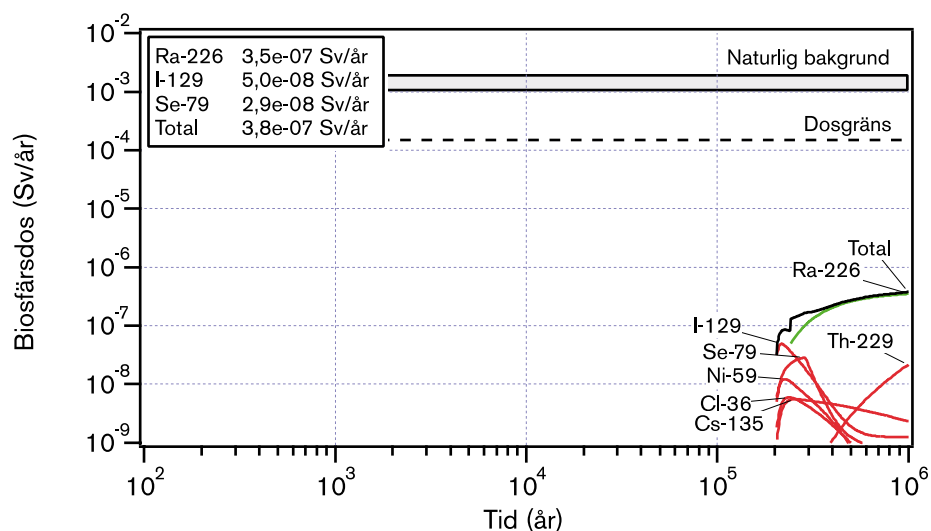
Figur 9-36 visar biosfärsdoser med pessimistiska sorptions- och diffusivitetsdata i geosfären för det salta vattnet vid Aberg.

För alla sorberande nuklider påverkas retentionen starkt då man går från rimliga till pessimistiska data vid Aberg.

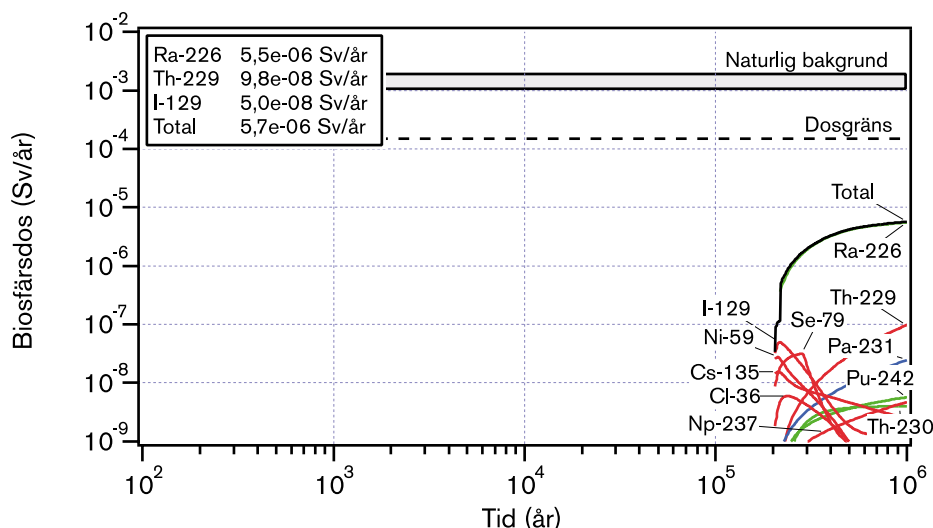
I figur 9-37 är detta tydligt för Ni-59, Cs-135, Th-229 och Ra-226. Detta är också det första av de hittills redovisade fallen där den maximala biosfärsdosen orsakas av en annan nuklid än I-129. Under i stort sett hela tiden då radionuklidtransport förekommer dominerar dosen av Ra-226. Den maximala dosen är fortfarande mindre än en hundradel av dosgränsen.

Effekten av att välja pessimistiska sorptions- och diffusivitetsdata vid Beberg och Ceberg är betydligt mindre dramatiska. Rimliga data avser sött vatten för båda platserna medan pessimistiska data gäller saltvatten i Beberg och sötvatten i Ceberg, se avsnitt 9.9.

Att effekterna är mindre vid dessa platser beror i första hand inte på att pessimistiska kemiska transportdata är mer gynnsamma än i Aberg. Pessimistiska data för Beberg är i själva verket desamma som för Aberg. Den stora effekten vid Aberg beror på att flödesrelaterade transportdata, som tillsammans med kemiska transportdata bestämmer retentionen för sorberande nuklider, är mindre gynnsamma.



Figur 9-36. Pessimistiska sorptions- och diffusivitetsdata i geosfären för Aberg.



Figur 9-37. Pessimistiska värden på flödesrelaterade data i geosfären för Aberg.

För dessa nuklider är retentionsförmågan god vid Aberg med alla data rimliga medan pessimistiskt valda kemiska data ger en kraftig minskning av retentionsförmågan. Se vidare diskussion i avsnitt 9.11.11.

Flödesrelaterade data i geosfären

Figur 9-37 visar hur osäkerheter i flödesrelaterade data i geosfären vid Aberg påverkar resultaten. Viktigast är här F-faktorn, dvs produkten av den flödesvättan a_w och den advektiva gångtiden t_w , se avsnitt 9.9.7.

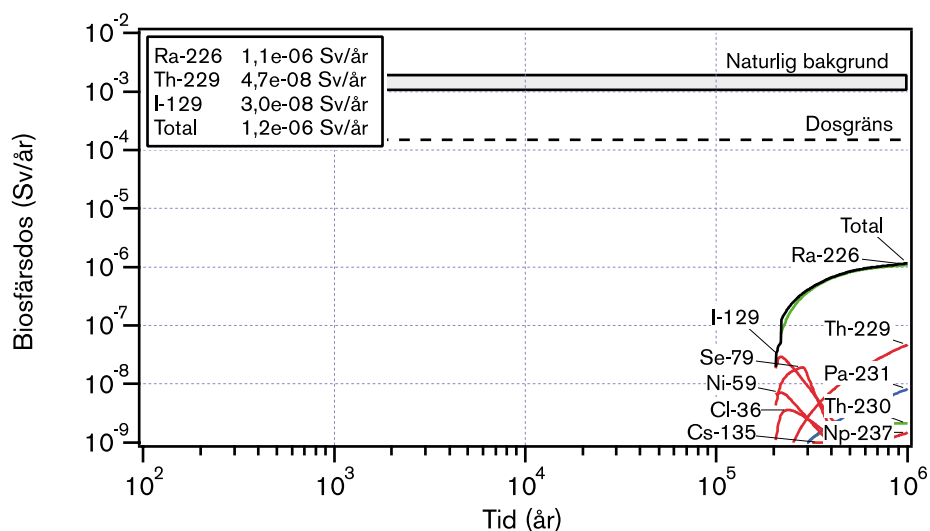
Även Peclets tal och maximalt inträngningsdjup valdes pessimistiskt i detta fall, men effekten av detta är liten.

Effekterna på samtliga sorberande nuklider är här ännu mer påtagliga. Förklaringen är densamma som ovan: Pessimistiskt valda flödesrelaterade data ger kraftigt försämrade retentionsegenskaper vid Aberg, vilket bl a innebär att transporttiden för Ra-226 blir kort jämfört med nuklidens halveringstid.

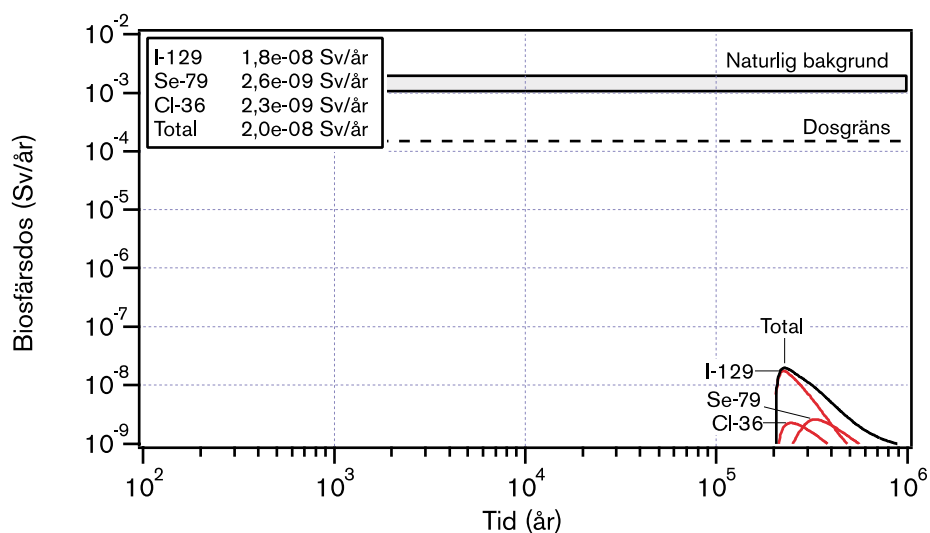
Den maximala dosen är ungefär en tjugondel av dosgränsen. I själva verket är retentionen i det närmaste obefintlig för de långlivade nuklider som visas i figuren för detta fall. Figur 9-37 är nästan identisk med figur 9-50, avsnitt 9.11.10 där geosfärens retention som ett extremfall helt försumrats. För Beberg och speciellt Ceberg är effekterna betydligt mindre dramatiska, se figur 9-38 och figur 9-39.

Tabell 9-4. Rimliga och pessimistiska värden för advektiva gångtider och flödesvätt yta. För Ceberg kunde endast ett pessimistiskt värde för a_w uppskattas. Samma värde används som "rimligt" i beräkningarna.

	Advektiv gångtid (år)		Flödesvätt yta (m^{-1})	
	Rimligt	Pessimistiskt	Rimligt	Pessimistiskt
Aberg	10	0,8	10^4	10^3
Beberg	60	3,3	10^4	10^3
Ceberg	2 000	400	10^3	10^3



Figur 9-38. Pessimistiska värden på flödesrelaterade data i geosfären för Beberg.



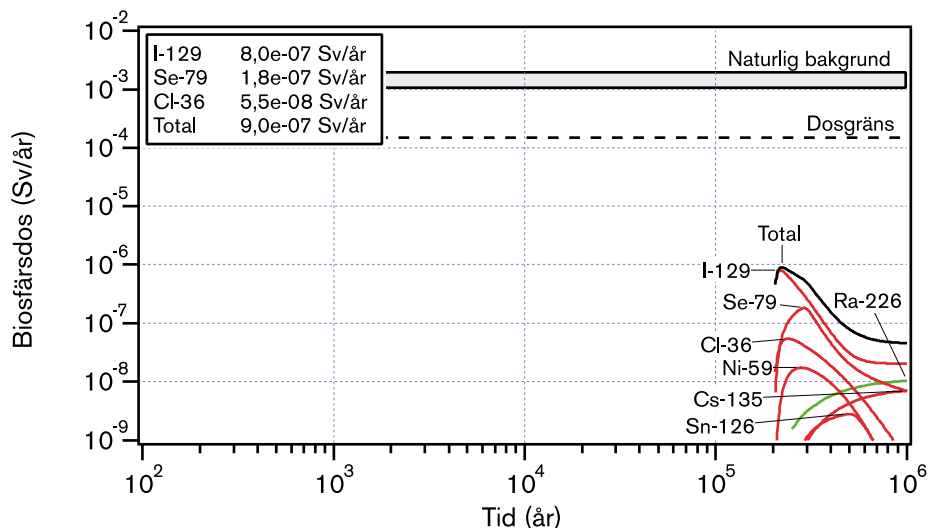
Figur 9-39. Pessimistiska värden på flödesrelaterade data i geosfären för Ceberg.

Skillnaden mellan rimliga och pessimistiska värden för de advektiva gångtiderna åter speglar den naturliga variabiliteten vid respektive plats. Variabiliteten är ett resultat av att olika positioner i förvaret har olika egenskaper samt av den stokastiska naturen hos berget. Den förra faktorn kan i viss mån påverkas genom aktiva val av kapselpositioner, den senare kan i princip inte påverkas.

Den naturliga variabiliteten i gångtid vid speciellt Aberg ger alltså kraftiga variationer i retention av sorberande nuklider, se vidare diskussion i avsnitt 9.11.11.

Biosfärdata

Figur 9-40 visar effekten av att välja pessimistiska biosfärdata för Aberg. I det rimliga fallet har biosfärmodulen antagits vara en torvmosse och rimliga doskonverteringsfaktorer för en sådan har använts. I det pessimistiska fallet har för varje nuklid den modul som ger den högsta konverteringsfaktorn valts. Konverteringsfaktorn har dessutom beräknats pessimistiskt. Resultatet i Aberg blir för de flesta nuklider utsläpp till en torvmosse även för det pessimistiska fallet, men alltså med pessimistiskt valda konverteringsfaktorer i denna modul.



Figur 9-40. Pessimistiska värden på biosfärsdata för Aberg.

Figuren visar att doserna ökar omkring en faktor tio för de flesta radionuklider. Detta är en direkt följd av att de pessimistiska EDF-värdena för torvmosse är ungefär tio gånger högre än de rimliga.

Sammanfattning Aberg, Beberg och Ceberg

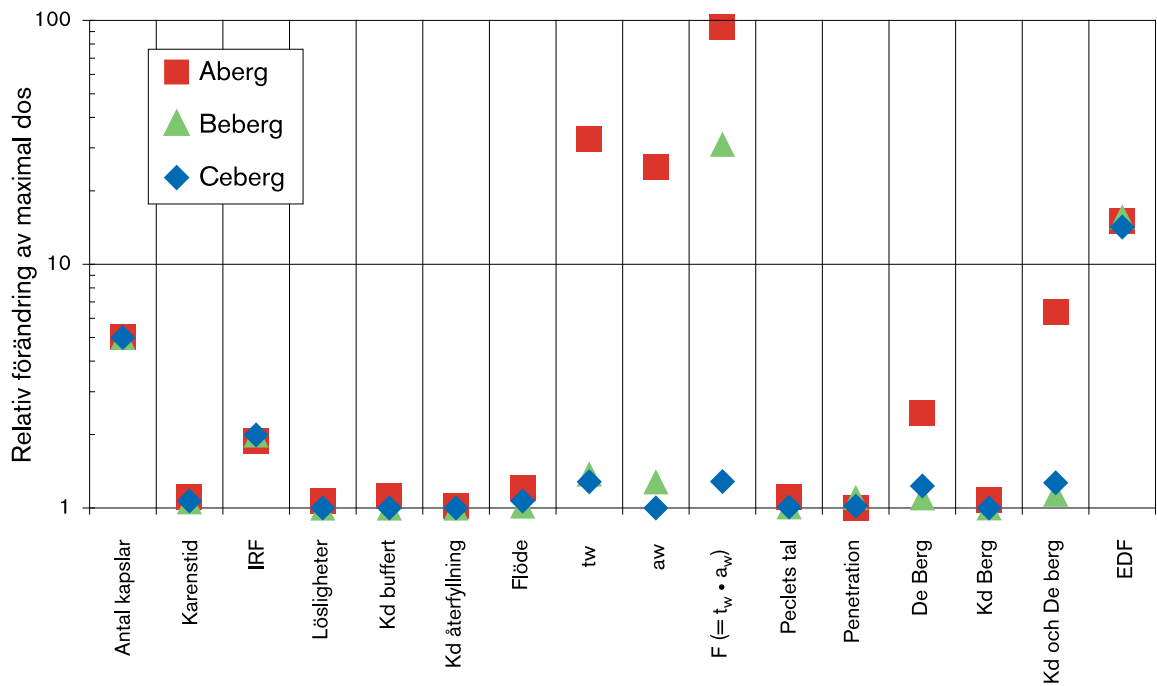
Oavsett vilken datagrupp som väljs pessimistiskt i osäkerhetsanalyserna ovan ligger den maximala dosen under dosgränsen. Figur 9-41 är en sammanställning av hur variationer i varje enskild parameter påverkar resultatet vid var och en av platserna.

Figuren visar förändringen (ökningen) i maximal dos om respektive parameter ändras från rimligt till pessimistiskt värde. Den maximala dosen avser tiden fram till en miljon år efter deponering.

Figuren visar att de största effekterna för Aberg fås för antalet initialt defekta kapslar, F-faktorn (produkten $t_w \cdot a_w$) och dosfaktorerna i biosfären (EDF-värden). Många av de övriga parametrarna har liten inverkan på resultatet om de varierar utgående från det genomgående rimliga fallet. Resultatet är i överensstämmelse med genomgången av de olika parametergrupperna ovan. Effekterna av att variera F-faktorn orsakas framför allt av en försämrad retention av Ra-226.

Det uppskattade antalet initialt skadade kapslar skulle kunna förbättras med data och erfarenheter från den framtida kapseltillverkningen. Inverkan av osäkerheter hos F-faktorerna skiljer mellan de tre platserna. Här kan alltså resultatet påverkas genom platsval. Inom en plats kan osäkerheterna delvis nedbringas genom att undersöka platsen väl, men en stor del av spridningen i F-faktorer orsakas av rumslig variabilitet inom platsen. Denna kan endast delvis nedbringas genom lämpliga val av kapselpositioner etc. Osäkerheterna kring EDF-värdena bör kunna nedbringas med ökad förståelse för och därmed förbättrad modellering av radionuklidspridning i biosfären.

Dessa enkla osäkerhetsanalyser kompletteras av riskanalyserna i nästa avsnitt, där effekter av kombinationer av rimliga och pessimistiska data systematiskt undersöks.



Figur 9-41. Effekten av att variera olika parametrar utgående från det allt igenom rimliga fallet.

9.11.9 Riskanalyser

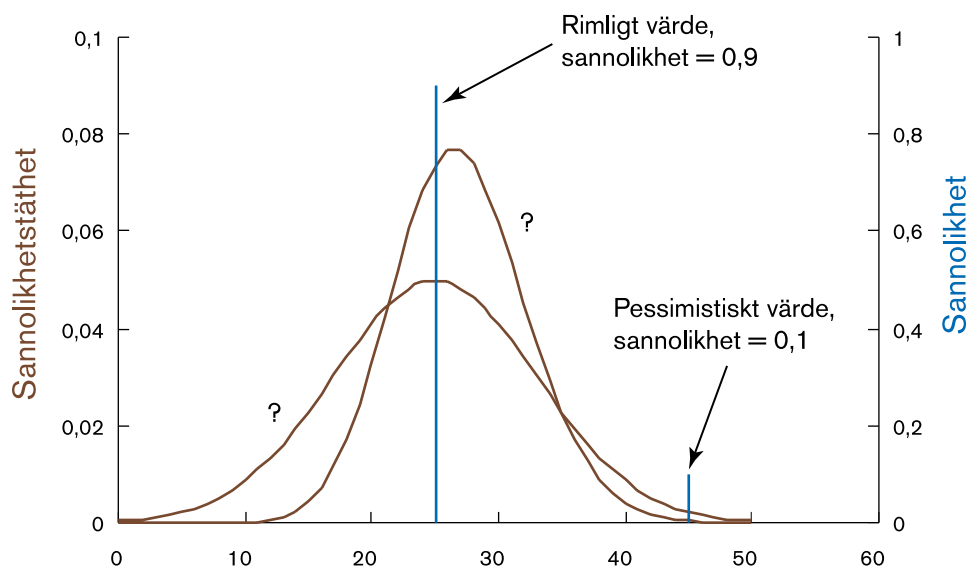
Det angivna kriteriet för förvarets säkerhet är ett riskmått, dvs en summering av produkter av sannolikheter och konsekvenser för olika möjligheter för förvarets utveckling.

Hittills redovisade beräkningar visar endast konsekvensen i form av dos för olika dataval till modellerna. För att kunna beräkna en risk måste också sannolikheten för olika datauppsättningar uppskattas.

Som framgått av kapitel 4 finns sannolikhetsfördelningar endast tillgängliga för en begränsad del av dataunderlaget såsom vissa flödesrelaterade data i geosfären. För den stora majoriteten data finns endast rimliga och pessimistiska värden, men ingen uppskattning av tillhörande sannolikheter.

De pessimistiska värdena är genomgående valda för att säkert utgöra en övre gräns för respektive parameters (negativa) inverkan på beräkningsresultatet. Många pessimistiska data måste därför betraktas som mycket osannolika. Även rimliga data är ofta försiktigt valda; i många fall kan ytterligare forskning, noggrannare mätningar etc, mycket väl leda till att dessa data förskjuts i en positiv riktning.

Baserat på ovanstående ansätts sannolikheten 0,9 för rimliga data och sannolikheten 0,1 för pessimistiska data i de flesta fall där inga fördelningar finns att tillgå. Situationen illustreras i figur 9-42. I stället för att gissa utseendet hos en hel fördelning görs en grov uppskattning av sannolikheten för rimliga respektive pessimistiska data. (X-axelns gradering är godtycklig i denna illustration; rimliga och pessimistiska värden kan ibland skilja flera tiopotenser.)



Figur 9-42. För indata där fördelningar saknas används rimliga och pessimistiska värden med sannolikheterna 0,9 respektive 0,1.

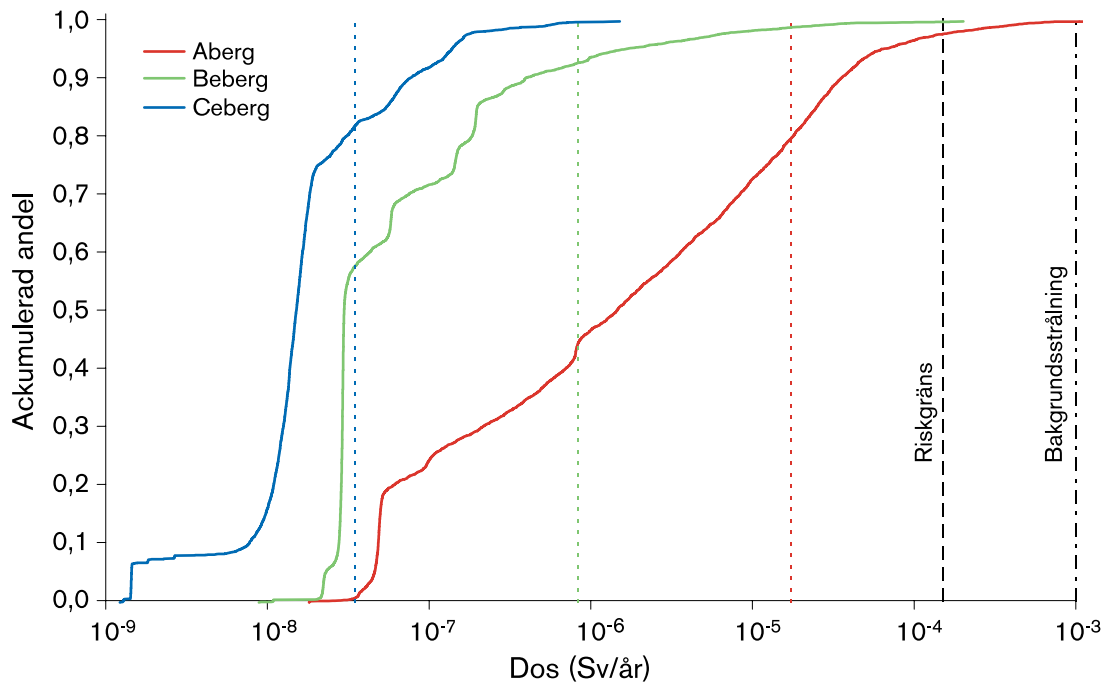
En probabilistisk beräkning genomförs för de tre försvarsplatserna med data enligt följande:

- Framräknade korrelerade fördelningar används för advektiva gångtider och flöden på försvarsdjup.
- Endast pessimistiska värden används för karenstid, sprickgeometrier kring deponeringshål, Peclets tal samt maximalt diffusionsinträngningsdjup i bergmatrisen. Anledningen är teknisk och relaterad till begränsningar i nuvarande version av beräkningsprogrammen. För dessa parametrar är inverkan av skillnaden mellan pessimistiska och rimliga värden på beräkningsresultatet begränsad.
- För återstående data, dvs antal trasiga kapslar, lösligheter, IRF-värden, sorptionsdata i bentonit, sorptionsdata i återfyllning, diffusions- och sorptionsdata och flödesvätt yta i geosfären, samt EDF-värden i biosfären ansätts sannolikheterna 0,9 och 0,1 för rimliga respektive pessimistiska data.

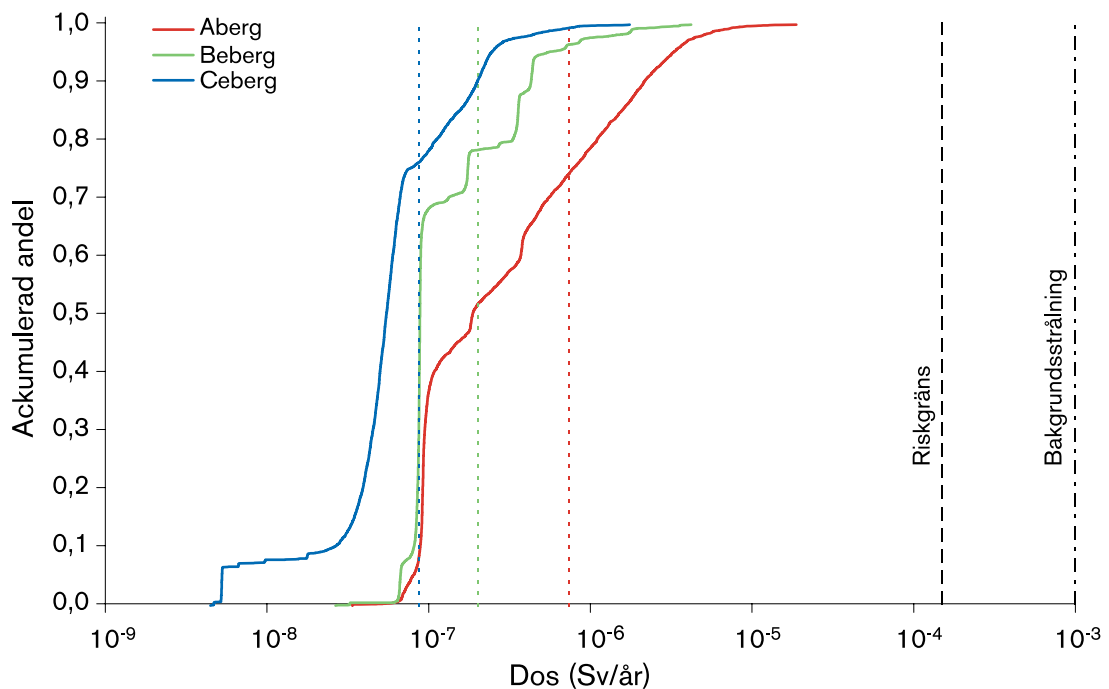
Flöden på försvarsdjup och advektiva gångtider är korrelerade enligt resultatet av de hydrologiska beräkningarna. Övriga indata till den probabilistiska beräkningen korreleras inte, vilket inte är helt korrekt. Samvariationer kan förekomma mellan olika nuklider vad gäller t ex EDF-värden så att dessa data bör vara åtminstone delvis korrelerade. Det är emellertid nästan alltid endast en nuklid som helt dominerar maxdosen i en enskild realisering. Genom att inte korrelera sådana data kommer fler realiseringar att innehålla ett pessimistiskt värde för åtminstone någon nuklid och därmed blir det pessimistiskt att inte inkludera sådana korrelationer.

Nukliderna i riskberäkningen är av kapacitetsskäl reducerad till de som under några förhållanden kan tänkas ge signifikanta bidrag till maxdosen, nämligen Ni-59, Nb-94, Sn-126, I-129, Pu-239 samt sönderfallskedjan U-238 → U-234 → Th-230 → Ra-226.

Resultaten i form av dosens fördelningsfunktion framgår av figur 9-43 och figur 9-44. Figurerna skiljer sig åt genom att olika biofärmoduler använts; en torvmosse i figur 9-43 och en platsspecifik brunn i figur 9-44.



Figur 9-43. Probabilistiska resultat för platsspecifika torvmossar. De färgade lodräta linjerna visar respektive fördelnings medelvärde, dvs den beräknade risken vid de tre platserna.



Figur 9-44. Probabilistiska resultat för platsspecifika brunnar. De färgade lodräta linjerna visar respektive fördelnings medelvärde, dvs den beräknade risken vid de tre platserna.

Det rimliga i att ansätta just de valda sannolikheterna kan bara bedömas genom att i varje enskilt fall studera tillvägagångssättet vid valet av rimliga och pessimistiska värden, vilket redovisas i Datarapporten. Sannolikhetsvärdena 0,9 och 0,1 bygger på en översiktlig sådan studie och bedöms alltså vara ett försiktigt val.

Syftet med beräkningarna är att bedöma risken förknippad med kapseldefekts scenariot. Risken i en situation där en rad olika utfall är möjliga definieras som summan av delriskerna för varje utfall. Delrisken är i sin tur produkten av sannolikhet och konsekvens för utfallet i fråga. Matematiskt uttrycks risken, R, som:

$$R = \sum_i p_i k_i$$

där p_i och k_i är sannolikhet respektive konsekvens för utfall i. Risken R blir därmed definitionsmässigt medelvärdet av samtliga konsekvenser.

För risken i kapseldefekts scenariot ger olika dataval till modellerna upphov till de olika utfallen. Konsekvensen väljs som den maximala årsdos som uppkommer under en miljon år. Risken blir därmed medelvärdet av maxdoserna i samtliga realiseringar. Medelvärdena för Aberg, Beberg och Ceberg finns därför inlagda i figur 9-43 och figur 9-44.

Medelvärdena ska jämföras med riskgränsen i figurerna. Denna är tillämplig på de mest utsatta individerna i en regional grupp, vilket också gäller de använda EDF-värdena för brunn respektive torv. Medelvärdena för samtliga platser ligger väl under riskgränsen, både i brunns- och torvfallen. Det är också uppenbart att säkerhetsmarginalen skiljer mellan platserna; den är störst i Ceberg och minst i Aberg.

För brunnsfallet är det också värt att notera att **samtliga** realiseringar för alla platser ligger mer än tio gånger under dosen som svarar mot riskgränsen i dessa beräkningar, dvs fördelningarna i figur 9-44 når aldrig nära riskgränsen.

Nästan alla realiseringar som ger signifikanta maxdoser i riskberäkningarna domineras antingen av I-129 eller, om geosfärsretentionen är svag, av Ra-226. En stor kapselskada uppkommer efter 20 000 år (pessimistiskt värde i samtliga realiseringar). Maxdosen av I-129 kommer kort därefter.

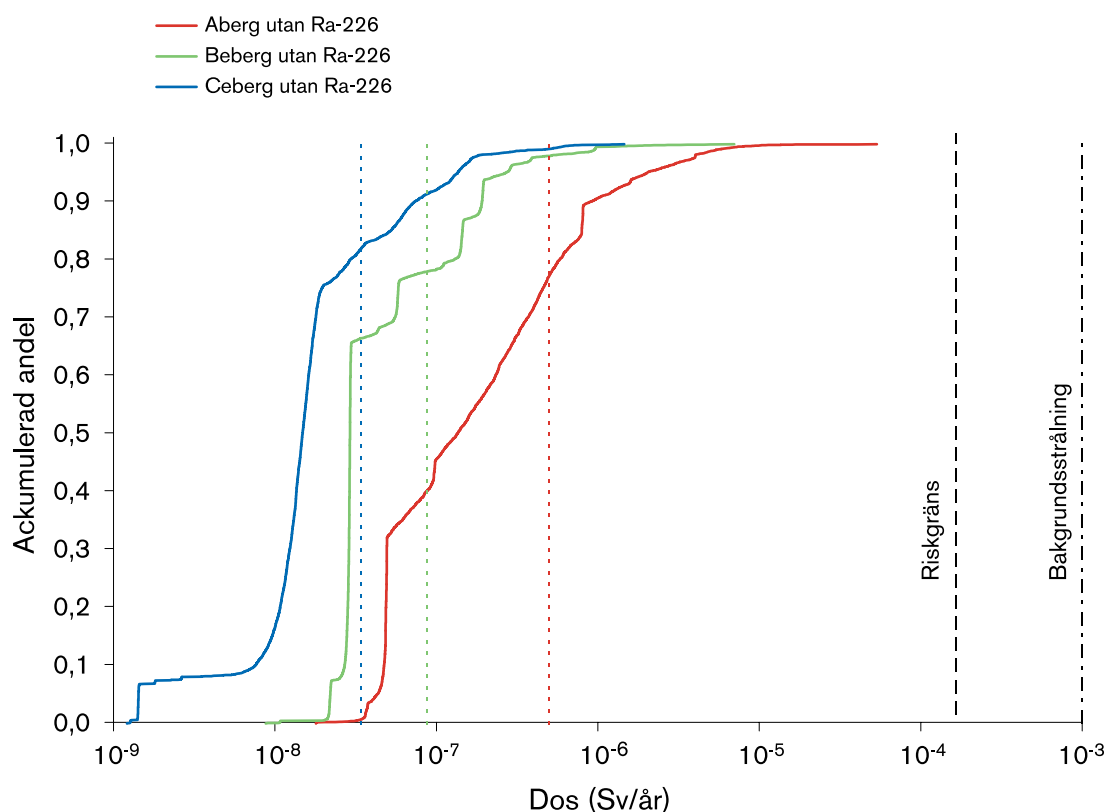
Maxdosen av Ra-226 uppkommer dock aldrig förrän efter mer än 100 000 år och detta av fundamentala skäl: Ra-226 finns inte i bränslet initialt utan bildas genom kedjesönderfall av det initiala innehållet av U-238 och U-234. Sönderfallskedjans natur gör att bildningstakten för Ra-226 blir signifikant först efter omkring 100 000 år.

För att belysa betydelsen av Ra-226 kan resultatet av riskberäkningen också utvärderas med Ra-226 uteslutet. Resultaten framgår av figur 9-45 och tabell 9-5. Resultatet påverkas kraftigt för torvekosystemet vid Aberg och Beberg, i övriga fall mer marginellt.

Effekten hade blivit ungefär densamma om riskberäkningen gjorts för en period av 100 000 år i stället för en miljon år eftersom signifikanta doser från Ra-226 kommer efter ungefär 100 000 år och för övriga nuklider som dominerar dosbilden kort efter att kapselskadan blivit stor, dvs 20 000 år.

Tabell 9-5. Relativa risker för torvekosystem och brunn med och utan Ra-226. Riskerna är uttryckta som andelar av acceptanskriteriet för mest exponerade individer, dvs 0,15 mSv/år.

	Torvekosystem		Brunn	
	med Ra-226	utan Ra-226	med Ra-226	utan Ra-226
Aberg	0,11	0,003	0,005	0,001
Beberg	0,006	0,0006	0,001	0,001
Ceberg	0,0002	0,0002	0,0006	0,0006



Figur 9-45. Riskberäkningen för torvmosse utan Ra-226. De färgade lodräta linjerna visar respektive fördelnings medelvärde, dos den beräknade risken vid de tre platserna.

I sammanfattning är de tre platserna relativt likvärdiga de inledande 100 000 åren. Skillnaderna mellan platserna är cirka en faktor tio och riskerna är alltid mindre än en procent av riskgränsen, för såväl brunn som torvekosystem. För tiden mellan 100 000 och en miljon år gäller samma slutsats för brunnsfallet. Med ett torvekosystem ökar risken vid Aberg och Beberg tio respektive 20 gånger, men ligger alltid väl under riskgränsen. En viktig anledning till att utslaget kommer för torvekosystemet är ackumulation av Ra-226 i torv, en process som ingår i biosfärmodellen. För att sätta resultatet i perspektiv kan noteras att många torvmossor i Sverige uppvisar kraftigt förhöjda halter av Ra-226, som kommer naturligt från berggrunden /Ek m fl, 1982/.

Resultaten ska också ses i ljuset av att omfattande nedisningar är att förvänta i Sverige inom en hundratusenårs period, ämnet för klimatscenariot, kapitel 10. En nedisning leder till att i stort sett hela markskiktet eroderas. Aberg kan förväntas vara havstäckt en avsevärd del av den kommande hundratusenårsperioden. Dessa aspekter vägs ihop i den samlade resultatdiskussionen av hela analysen i rapportens slutkapitel.

Robusthet

Formen hos fördelningarna i riskberäkningarna illustrerar också skillnader i förvarets "tålighet" mot parametervariationer: Betrakta fördelningen för Ceberg i figur 9-43. Den har ett nästan lodrätt parti kring dosen 10^{-8} Sv/år där den ackumulerade andelen realiseringar rör sig mellan 0,1 och drygt 0,7 dvs över 60 procent av realiseringarna ger doser kring 10^{-8} Sv/år. Dessa realiseringar rymmer ett stort antal parameterkombinationer som alltså alla ger likvärdiga resultat omkring 10^{-8} Sv/år, vilket också är maxdosen för fallet där alla parameterar väljs som rimliga, figur 9-28.

För omkring tio procent av realiseringarna är dosen lägre. Dessa realiseringar har advektiva gångtider som är längre än de som valts som rimliga. Om pessimistiska data kompenseras med "gynnsamma" skulle andelen med lägre doser bli större.

Övriga knappt 30 procent har resultat över 10^{-8} Sv/år. Endast för dessa realiseringar är parameterkombinationerna tillräckligt ogynnsamma för att ge en mer påtaglig påverkan på resultatet i ogynnsam riktning.

För Beberg ligger motsvarande "lodräta" område kring $3 \cdot 10^{-8}$ Sv/år (omkring maxdosen för det rimliga fallet) och omfattar cirka 60 procent av realiseringarna. Cirka 40 procent av realiseringarna har mindre gynnsamma resultat. Dessa spänner också över ett betydligt större dosintervall än motsvarande realiseringar för Ceberg.

För Aberg ligger det "lodräta" partiet kring $5 \cdot 10^{-8}$ Sv/år (omkring maxdos för rimligt fall) och omfattar endast 20 procent av realiseringarna. I 80 procent av realiseringarna blir parameterkombinationerna mindre gynnsamma i Aberg.

Utläggningen ovan illustrerar två saker:

- Aberg är mest och Ceberg minst känsligt för parametervariationer. "Höjden" hos det nästan lodräta partiet kan sägas vara ett mått på förvarets robusthet på respektive plats.
- Fördelningarna illustrerar också att data som är mer gynnsamma än de rimliga inte inkluderats (utom för gångtider och flöden på förvarsdjup): En mycket liten andel av realiseringarna har ett mer gynnsamt resultat än fallet med genomgående rimliga värden, dvs en mycket liten andel ligger till vänster om det "lodräta" partiet i respektive fördelning.

För brunnsfallet, figur 9-44, kan liknande observationer göras. Observera att fördelningarna här har en annan form, trots att de är resultatet av samma realiseringar som för torvfallet. Utsläppen från geosfären är exakt desamma men andra nuklider dominerar doserna för brunnen. Därmed omsätts geosfärsutsläppen på ett annat sätt och effekterna av olika parameterkombinationer i bränsle, buffert och geosfär blir andra än i torvfallet.

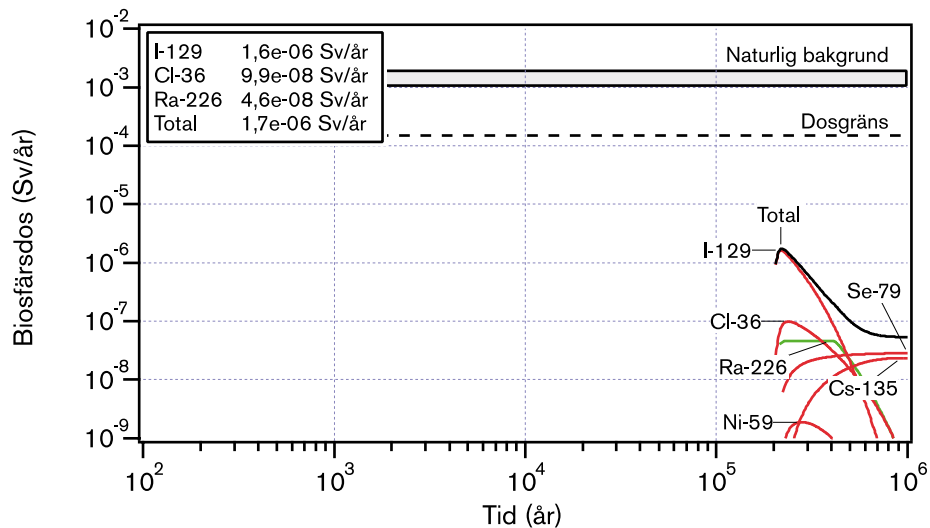
Också för robustheten gäller att skillnader mellan platserna framför allt gör sig gällande i ett mycket långt tidsperspektiv av samma skäl som i riskdiskussionen ovan.

9.11.10 Specialfall

För att belysa olika barriärers respektive roller i kapseldefekts scenariot har ett antal specialfall beräknats:

- Bränslet är fullständigt upplöst då en kontinuerlig vattenväg uppstår.
- Inga löslighetsbegränsningar.
- Stor initial kapselskada.
- Buffertens diffusionsmotstånd försummas.
- Geosfärens retention försummas.

Inget av fallen har någon realism. De är medtagna för att illustrera funktionen hos barriärssystemet. De förändringar som gjorts i modellerna rör endast radionuklidtransporten. Systemets utveckling i övrigt, t ex de hydromekaniska konsekvenserna av en stor initial kapselskada är inte behandlade. Utgångspunkten i samtliga beräkningsfall är rimliga data för Aberg.



Figur 9-46. Omedelbar bränsleupplösning.

Omedelbar bränsleupplösning

Figur 9-46 visar effekten av att anta att bränslet omedelbart löses upp då det kommer i kontakt med vatten. I övrigt används rimliga data för Aberg. Doserna för flera icke sorberande nuklider har ökat jämfört med det alltigenom rimliga fallet eftersom hela inventariet av dessa nuklider nu blir omedelbart tillgängligt för transport.

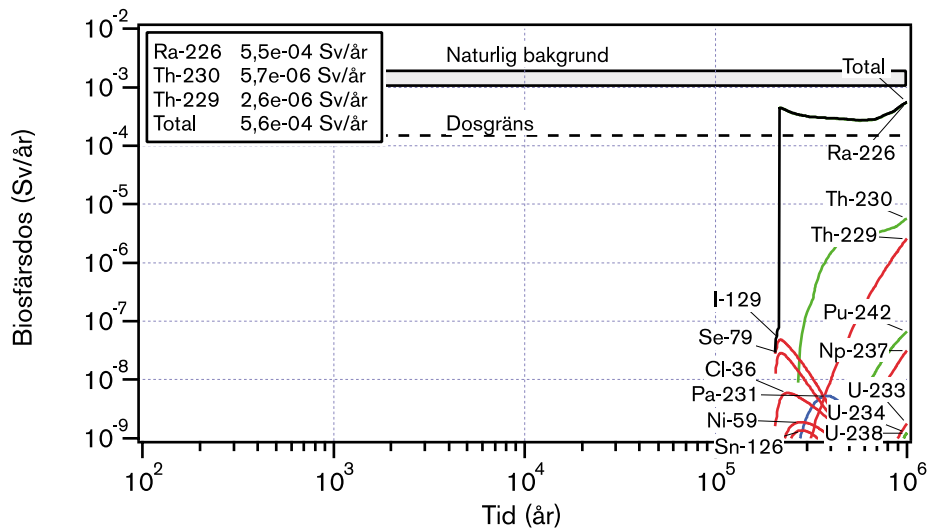
Effekten är i övrigt relativt begränsad, framför allt eftersom låga lösligheter begränsar utsläppen för många nuklider. Utsläppet av Ra-226 från närområdet blir tillräckligt stort för att ge ett bidrag till dosen efter retention i geosfären för detta fall. Halten Ra-226 i kapseln har nått löslighetsgränsen. Andra nuklider som ger markant ökade doser är Cs-135 och Se-79.

Den viktigaste slutsatsen av detta variationsfall är att bränsleupplösningshastigheten, som är svår att uppskatta, har en begränsad betydelse för barriärsystemets samlade funktion.

Inga löslighetsbegränsningar

Figur 9-47 visar effekten av att bortse från alla löslighetsbegränsningar för radionuklider i vattnet i kapselns hålrum.

Flera långlivade isotoper av uran, plutonium, neptunium och torium uppträder i figuren. Doser från Ra-226 överskrider dosgränsen. I detta fall bidrar också bildning av Ra-226 från modernuklider i buffert och geosfär. Dosbidragen från nuklider som inte heller i det rimliga fallet antas ha någon löslighetsgräns, som I-129 och Cl-36 är oförändrade. Beräkningsfallet illustrerar det stora bidraget lösligheterna ger till barriärsystemets funktion. Värden för lösligheterna hos bl a uran, plutonium, neptunium och torium kan visserligen variera, vilket spannet mellan rimliga och pessimistiska värden illustrerar. Själva existensen av löslighetsgränser och att dessa kan ges pessimistiska övre värden vilar däremot på fundamental termodynamisk grund.



Figur 9-47. Inga löslighetsbegränsningar.

Stor initial kapselskada

Figur 9-48 visar effekten av att kapseln redan initialt har en 1 dm² stor skada.

Fallet kan jämföras med det där pessimistiska värden för kapselskador antas, figur 9-32. I det fallet blir biosfärsdoserna omkring 10⁻³ mSv/år efter 20 000 år, i fallet med stor initial skada ger Sr-90 och I-129 tillsammans doser av den storleken redan efter 100 år och framåt.

Barriärsystemet i övrigt ger alltså ett gott skydd även med en helt orimlig initial skada. De hydromekaniska konsekvenserna vad gäller korrosion av insatsen med åtföljande gasbildning etc är inte behandlade i detta fall.

Inget diffusionsmotstånd i bufferten

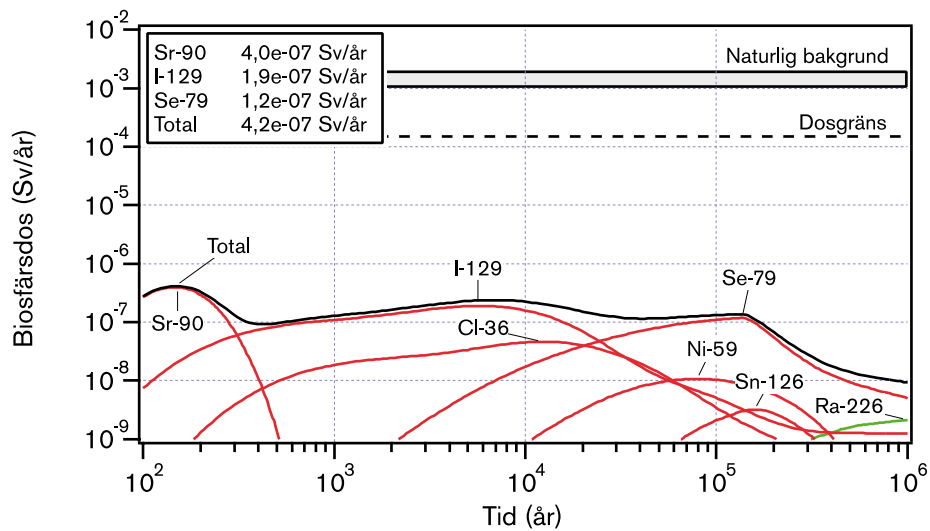
Figur 9-49 visar konsekvenserna av att försumma diffusionsmotståndet vid radionuklidtransport i bufferten.

Buffertmaterialet har ersatts med vatten. Effekterna är mycket begränsade eftersom andra transportmotstånd, framför allt det från gränsskiktet mellan buffert och berg, ändå dominerar för många nuklider. Jämfört med figur 9-34, som visar effekterna av att anta pessimistiska sorptionsdata för bufferten, är de maximala, relativt kortvariga utsläppen av I-129, Cl-36 och Se-79 omkring tio gånger högre.

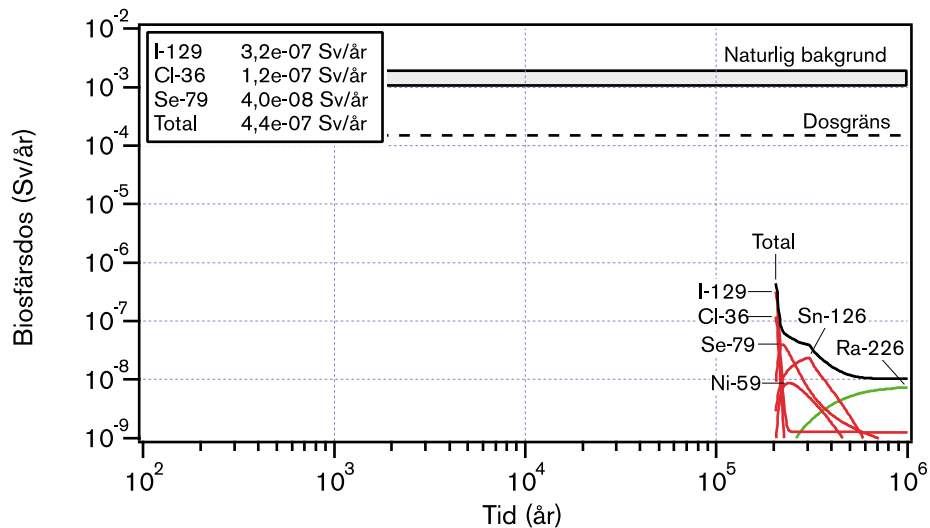
Återigen är slutsatsen att i detta fall buffertens funktion vad gäller radionuklidtransport väl täcks upp av andra barriärer.

Ingen geosfärsretention

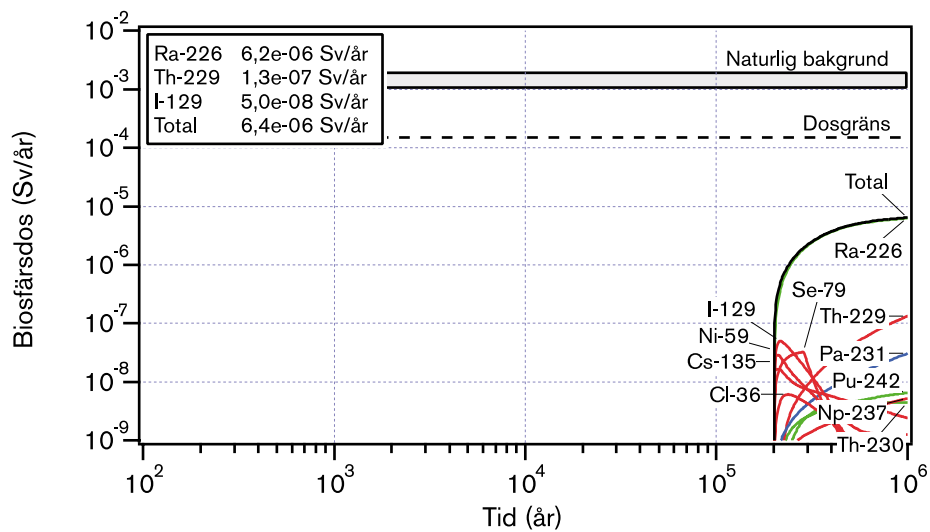
Figur 9-50 visar konsekvensen av att helt bortse från geosfärens retention vid Aberg. Utsläppen från närzonen har antagits nå biosfären omedelbart. Den enda geosfärsfunktion som behållits är att ett rimligt värde för transportmotståndet mellan buffert och geosfär använts.



Figur 9-48. Stor initial kapselskada.



Figur 9-49. Inget diffusionsmotstånd i bufferten.



Figur 9-50. Ingen retention i geosfären.

Resultatet är i det närmaste identiskt med det som visas i figur 9-37 där pessimistiska värden för flödesrelaterade transportdata för geosfären vid Aberg antagits. Detta illustrerar i första hand den stora variabiliteten hos geosfären. Effekten av att gå från rimliga till pessimistiska data blir i det närmaste densamma som att helt försumma geosfärens retention.

Slutsatser

Variationsfallen ovan illustrerar flerbarriärprincipen vad gäller radionuklidtransport. Inte ens extrema och helt orealistiska antaganden om en enskild barriärfunktion ger oacceptabla konsekvenser.

9.11.11 Analytiska beräkningar

Närområde

I Hedin /1999/ härleds en enkel analytisk modell för frigörelse och transport av radionuklider i kapsel och buffert. Modellen hanterar:

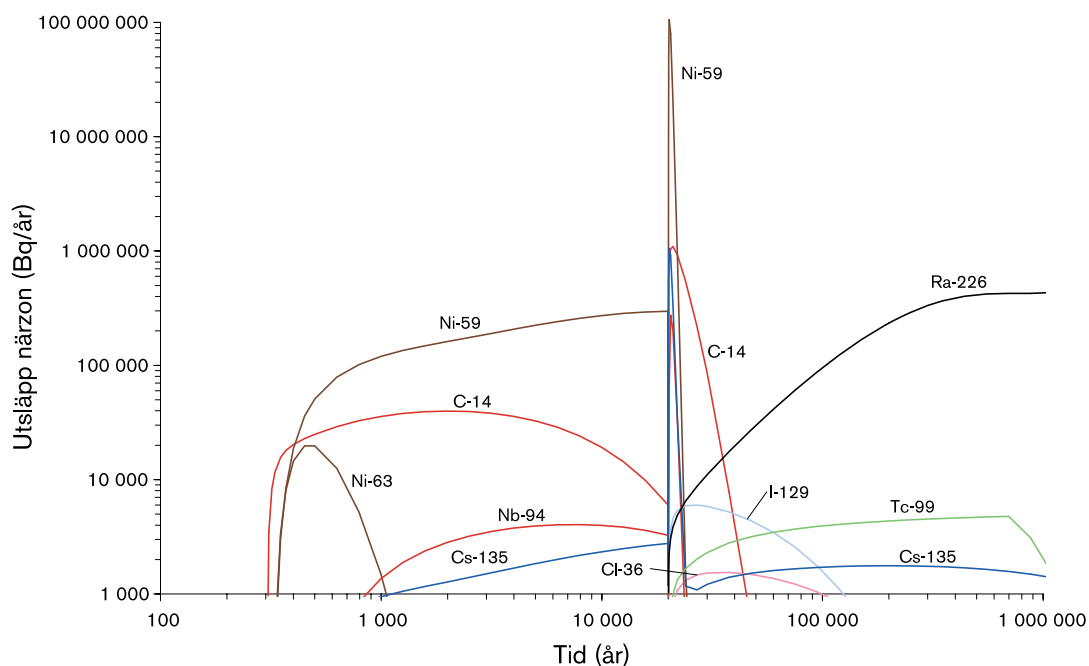
- radioaktivt sönderfall i hela närområdet, i bränslematrisen även kedjesönderfall,
- bränsleupplösning,
- frigörelse av omedelbart tillgänglig fraktion radionuklider (IRF) i kapseln,
- löslighetsbegränsningar,
- diffusiv transport genom en skadad kapsel,
- transient och stationär transport, diffusion och sorption, genom buffert,
- utsläpp till det omgivande berget via de två viktigaste utsläppsvägarna, Q1 och Q2, som behandlas i COMP23.

Figur 9-51 visar resultatet av en beräkning av närzonsutsläpp vid Aberg. Pessimistiska värden har använts för data relaterade till kapselskador och till gränsskiktet mellan buffert och berg.

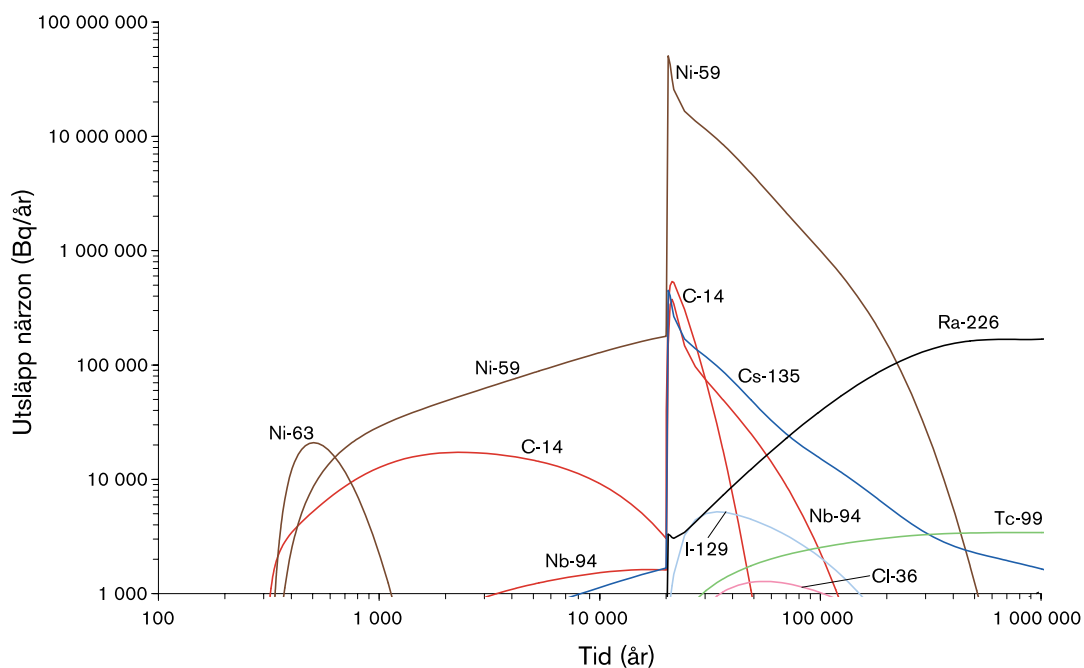
Resultatet ska jämföras med figur 9-52 som är beräknad med COMP23 med samma data. Avvikelserna vad gäller maximalt beräknade utsläpp är mindre än en faktor tio för samtliga nuklider i detta fall. Den största skillnaden gäller för många nuklider i det långsiktiga tidsförloppet efter den maximala dosen. Anledningen är den förenklade modelleringen av radionuklidspridning i bufferten.

En förenklad modell som denna kan aldrig helt ersätta en numerisk modell som COMP23, speciellt inte vad gäller modellering av komplicerade geometrier. Den analytiska modellen är däremot värdefull för att:

- demonstrera en förståelse för hur resultaten kvantitativt beror av indata,
- underlätta en granskning av rimligheten i de modellberäknade utsläppen från närområdet,
- säkerställa kvaliteten i datahanteringen till den numeriska modellen.



Figur 9-51. Utsläpp från närområdet för pessimistiska värden för data relaterade till kapselskador och gränsskiktet mellan buffert och berg vid Aberg. Analytisk beräkning.



Figur 9-52. Numerisk beräkning med COMP23 av samma fall som i figur 9-51.

Med de analytiska uttrycken är det t ex enkelt att visa att transportmotståndet i närområdet kraftigt domineras av det lilla hålet i kapseln fram till den tidpunkt då skadan förstoras på grund av inre tryck från korrosionsprodukter (efter 20 000 år i detta exempel). Den analytiska modellen är en första version som kan utvecklas till kommande säkerhetsanalyser.

Geosfären

Även de väsentliga transportegenskaperna hos geosfären kan beskrivas med relativt enkla analytiska uttryck. Av ett pulsutsläpp från förvaret kommer efter sönderfall under transport genom geosfären slutligen andelen T att ha nått biosfären där

$$T = e^{-\lambda t_w - t_w a_w \sqrt{\lambda D_e [\varepsilon_p + (1 - \varepsilon_p) K_d \rho]}}$$

Här är λ nuklidens sönderfallskonstant, t_w den advektiva gångtiden, a_w den flödesvätta ytan per volym flödande vatten, ε_p matrisporositeten samt D_e , K_d och ρ diffusivitet, sorptionskoefficient respektive densitet i berget, se t ex Carslaw och Jaeger /1959/. Produkten $t_w \cdot a_w$ är lika med F-faktorn.

T benämns transmission och anger alltså hur stor andel av ett utsläpp av en viss radionuklid som passerar geosfären utan att sönderfalla. Uttrycket gäller inte bara ett pulsutsläpp utan för ett godtyckligt tidsberoende utsläpp, eftersom ett sådant alltid kan beskrivas som en serie pulsutsläpp.

Vid härledningen av uttrycket har samma processer och antaganden om sprickgeometrier etc som i fjärrområdesmodellen FARF31 använts, förutom att dispersion bortsetts ifrån och bergmatrisen antagits ha ett oändligt inträngningsdjup. Effekten av båda dessa antaganden är begränsad.

För att diskutera geosfärens funktion vad gäller radionuklidtransport är det illustrativt att beräkna transmissionen för en rad nuklider med olika kombinationer av rimliga och pessimistiska data. Tabell 9-6 visar resultatet av en sådan beräkning för Aberg.

Tabell 9-6. Transmission för en rad nuklider vid Aberg. Transmissionen är angiven i procent. R och P betyder rimliga respektive pessimistiska data för respektive parameter. < betyder mindre än 0,001 procent.

	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
t_w	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
a_w	R	R	P	R	R	P	R	R	P	R
K_d	R	R	R	P	R	R	P	R	P	P
D_e	R	R	R	R	P	R	R	P	P	P
C-14	14	86	82	25	82	98	90	98	100	87
Cl-36	99	100	100	99	100	100	100	100	100	100
Ni-59	17	87	84	28	57	99	90	96	100	67
Ni-63	<	2	1	<	<	67	6	29	91	0,002
Sr-90	0,004	44	29	0,1	4	91	56	77	96	9
Nb-94	<	10	5	<	0,01	79	19	48	95	0,1
Tc-99	0,01	49	41	1	6	93	67	80	99	21
Sn-126	66	97	96	98	88	100	100	99	100	99
I-129	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cs-135	38	93	91	65	73	99	97	98	100	87
Cs-137	<	<	<	<	<	13	0,01	0,2	74	<
Ra-226	<	33	24	0,005	1	89	45	70	97	4
Pa-231	<	16	10	<	0,1	83	28	56	96	1
U-234	<	23	16	0,02	0,3	86	51	62	98	7
Pu-239	<	1	0,3	<	<	62	12	22	93	0,02

Tabellen visar en rad saker för Aberg:

- Vissa nuklider tränger igenom geosfären även för allt igenom rimliga data. Det gäller långlivade icke-sorberande nuklider som I-129 och Cl-36. Även C-14, Cs-135 och Sn-126 har förhållandevis höga transmissionsvärden för rimliga data.
- Om bara någon parameter väljs pessimistiskt är retentionsförmågan mycket begränsad vid Aberg för nukliderna i punkten ovan och i många fall också för Ra-226, Ni-59, Sr-90 och Tc-99.
- Den enskilda parameter som mest påverkar resultatet är den advektiva gångtiden t_w . Med ett pessimistiskt t_w och i övrigt rimliga värden är retentionen mycket begränsad för de flesta redovisade nuklider.
- För allt igenom pessimistiska data har geosfären vid Aberg mycket dålig retentionsförmåga för samtliga redovisade nuklider.

Tabell 9-7 visar motsvarande beräkning för Beberg. Tabellen visar bl a att:

- Långlivade icke sorberande nuklider som I-129 tränger igenom geosfären även för allt igenom rimliga data.
- Den enskilda parameter som mest påverkar resultatet är den advektiva gångtiden t_w . Effekten är dock mindre än vid Aberg.
- Om både t_w och a_w , väljs pessimistiskt, dvs med en extremt pessimistisk F-faktor, är retentionen vid Beberg mycket begränsad.
- Pessimistiska värden för kemiska transportdata (diffusiviteter och sorptionskoefficienter) förändrar inte retentionen nämnvärt vid Beberg.

Tabell 9-7. Transmission för en rad nuklider vid Beberg. Transmissionen är angiven i procent. R och P betyder rimliga respektive pessimistiska data för respektive parameter. < betyder mindre än 0,001 procent.

	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
t_w	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
a_w	R	R	P	R	R	P	R	R	P	R
K_d	R	R	R	P	R	R	P	R	P	P
D_e	R	R	R	R	P	R	R	P	P	P
C-14	3	82	69	7	31	98	87	94	100	44
Cl-36	99	100	100	99	100	100	100	100	100	100
Ni-59	<	27	9	<	0,1	88	39	66	97	0,5
Ni-63	<	<	<	<	<	3	<	0,001	44	<
Sr-90	<	<	<	<	<	0,1	<	0,1	56	<
Nb-94	<	0,01	<	<	<	38	0,1	5	81	<
Tc-99	<	5	0,4	<	<	74	20	39	95	0,01
Sn-126	8	87	78	90	46	99	99	96	100	97
I-129	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cs-135	<	4	0,3	<	0,3	72	24	72	99	7
Cs-137	<	<	<	<	<	<	<	<	2	<
Ra-226	<	0,003	<	<	<	35	0,1	4	79	<
Pa-231	<	0,05	<	<	<	47	0,5	9	85	<
U-234	<	0,2	0,001	<	<	54	6	14	92	<
Pu-239	<	<	<	<	<	14	0,02	0,2	76	<

Tabell 9-8 visar motsvarande beräkning för Ceberg. Tabellen visar bl a att:

- Långlivade icke sorberande nuklider som I-129 tränger igenom geosfären även för allt igenom rimliga data.
- Den enskilda parameter som mest påverkar resultatet är den advektiva gångtiden t_w men effekten är begränsad.
- Även om samtliga parametrar väljs pessimistiskt är försämringen av retentionen vid Ceberg mycket måttlig.

Tabell 9-8. Transmission för en rad nuklider vid Ceberg. Transmissionen är angiven i procent. R och P betyder rimliga respektive pessimistiska data för respektive parameter. < betyder mindre än 0,001 procent.

	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
t_w	R	P	R	R	R	P	P	P	P	R
a_w	R	R	P	R	R	P	R	R	P	R
K_d	R	R	R	P	R	R	P	R	P	P
D_e	R	R	R	R	P	R	R	P	P	P
C-14	<	8	<	0,01	2	8	17	44	55	5
Cl-36	97	99	97	97	99	99	99	100	100	99
Ni-59	<	<	<	<	<	<	0,001	1	3	<
Ni-63	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Sr-90	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Nb-94	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Tc-99	<	<	<	<	<	<	<	0,001	0,2	<
Sn-126	0,03	19	0,03	69	7	19	93	59	98	88
I-129	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cs-135	<	<	<	<	<	<	<	2	17	0,02
Cs-137	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Ra-226	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
Pa-231	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
U-234	<	<	<	<	<	<	<	<	0,003	<
Pu-239	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<

9.11.12 Gasfastransport

En defekt kapsel förväntas under mycket lång tid innehålla vätgas, se avsnitt 9.6. Radionuklider skulle därmed kunna transporteras till ytan i gasfas vid ett utsläpp av väte. Kol-14 och radon-222 är de enda kvarvarande radionuklider som kan tänkas transporteras i gasfas vid de tider en sådan transport kan vara möjlig enligt avsnitt 9.6.

Utsläpp av kol-14

C-14 skulle kunna förekomma som koldioxid eller metan, vilket medför att den kan transporteras i gasfas. En stor del av gasen i en kapsel förväntas att släppas ut som en puls. Transportmotståndet i både när- och fjärrområdet är små för gastransport. I SR 95 /SKB, 1995/ illustrerades betydelsen av gasfastransport med ett extremfall:

- 2,5 procent av inventariet av C-14 släpptes ut redan vid tiden för deponering.
- Gasen släpptes direkt till biosfären utan fördröjning.
- Dosen beräknades på samma sätt som för gasutsläpp från uppberedningsanläggningar.

Med dessa förutsättningar blev kollektivdosen 480 μmanSv för C-14 lokalt och regionalt.

Utsläpp av radon-222

Efter några hundra tusen år har den totala mängden Rn-222 i en kapsel vuxit till cirka 10^{11} Bq för att därefter förbli tämligen konstant. Med samma förutsättningar som ovan skulle som ett extremt övre grännsfall hela denna mängd kunna frigöras till atmosfären. Den korta halveringstiden (3,8 dagar) tillsammans med den stora utspädningen vid atmosfäriska utsläpp, gör dock att doskonsekvensen av ett sådant gasutsläpp blir försumbar.

Slutsats

Baserat på redovisningarna ovan bedöms i SR 97 inte gasfastransport av radionuklider ha någon säkerhetsmässig betydelse för djupförvaret.

9.11.13 Resultatdiskussion

Risikanalyser

Förvaren vid Aberg, Beberg och Ceberg uppfyller Strålskyddsinstitutets acceptanskrav för ett djupförvar för använt kärnbränsle.

Slutsatsen är baserad på beräkningar med den försiktiga uppskattningen att sannolikheten för att de pessimistiska värdena blir verklighet genomgående är 0,1. En uttömmande diskussion om sannolikheterna för rimliga respektive pessimistiska värden skulle föra mycket långt. I Datarapporten motiveras alla dataval utförligt och sannolikhetsbedömningar måste baseras på datavalen i de enskilda fallen. Valet av sannolikheten 0,1 för pessimistiska data är baserat på en översiktlig sådan utvärdering.

Om utsläppet sker till en brunn blir risken vid Aberg mindre än en hundradel av acceptanskriteriet om beräkningen görs för en tidsperiod av en miljon år. Risken vid Beberg är cirka fem gånger lägre och vid Ceberg omkring tio gånger lägre än den vid Aberg.

Vid utsläpp till torvekosystem skiljer sig platserna ungefär på samma sätt för tider upp till omkring 100 000 år. I ett miljonårsperspektiv ökar sedan risken vid Aberg med ungefär en faktor 40, vid Beberg en faktor tio och vid Ceberg marginellt. För tider över 100 000 år dominerar den naturliga radionukliden Ra-226 konsekvenserna för torvekosystemet.

Den beräknade retentionsförmågan är likvärdig vid de tre platserna för långlivade icke sorberande nuklider. För sorberande nuklider är retentionen starkast vid Ceberg och svagast vid Aberg.

Riskberäkningarna avser den maximala dosen som uppkommer under 100 000 år alternativt en miljon år. Maxdosen uppkommer alltid vid tider efter 20 000 år. För tider upp till 20 000 år ger även en initialt defekt kapsel ett avsevärt skydd också med den mest pessimistiska bedömningen av utvecklingen.

Hur skiljer sig platserna åt?

Geosfären: Bergets retentionsförmåga har betydelse för förvarets fördröjande funktion vid en kapselskada. Förmågan är nuklidspecifik och avgörs av halveringstiden, nuklid-specifika kemiska faktorer och av bergets flödesegenskaper. De senare uttrycks av F-faktorn, dvs produkten av den advektiva gångtiden och den flödesvätta ytan.

Från osäkerhetsdiskussionen kring den hydrauliska modelleringen är det också värt att rekapitulera bedömningen att beräknade skillnader i gångtider och flöden mellan platserna troligen till stor del är fysiskt baserade och kan härledas till platsspecifika hydrogeologiska förhållanden. Bergmassan i Aberg och Beberg är t ex cirka 100 gånger mer genomsläpplig än den i Ceberg. En del av skillnaden kan dock orsakas av skillnader i undersökningsmetodik mellan platserna.

I dos- och riskberäkningarna dominerar dock ofta icke sorberande nuklider, framför allt I-129, som alltid tränger genom berget, oavsett F-faktorns värde. Detta gör att effekten av skillnader i F-faktorer mellan platser till viss del utjämnas i en total riskbedömning.

Biosfären: Biosfärsförhållandena har stor inverkan på den beräknade dosen. Doserna blir flera tiopotenser lägre om utsläppet sker till vattendrag, sjöar eller havet, jämfört med om det sker till mark (torv, jordbruksmark, brunn). För Ra-226, som dominerar dosen i många ogynnsamma realiseringar, är dessutom EDF-värdet för torv mer än två tiopotenser högre än det för brunn.

Trots de stora skillnaderna i EDF-värden är det orimligt att ur säkerhetssynpunkt tillmäta dagens biosfärsförhållanden en stor betydelse vid platsdiskussioner. Biosfärstyperna torv, jordbruksmark och brunn finns eller kan sannolikt komma att finnas vid varje tänkbar djupförvaringsplats. Biosfärens roll i analysen måste också ses i ljuset av den omfattande påverkan på biosfären som följer av förväntade klimatförändringar, se vidare kapitel 10.

Osäkerhetsanalys

I osäkerhetsanalyserna studeras systematiskt effekten av att byta rimliga data mot pessimistiska. Man konstaterar först att för brunnsfallet överskrider inte dosen i någon enda realisering av riskberäkningen vid någon plats den dos som svarar mot riskgränsen. Detsamma gäller för torvmodulen vid Ceberg, medan dosen här överskrider i ett fåtal av de mest ogynnsamma realiseringarna vid Aberg och Beberg med Ra-226 inkluderad.

Detta är också en form av illustration av flerbarrriärsprincipen: En nedsatt funktion (pessimistiska värden) hos en barrriär leder inte till en oacceptabel funktion hos systemet som helhet. Marginalerna är här störst för Ceberg och minst för Aberg.

Kapsel: De svårbedömda osäkerheterna i antalet skadade kapslar (rimligt värde 1, pessimistiskt 5) påverkar resultatet direkt. Det är inte uppenbart hur dessa osäkerheter kan nedbringas i framtiden.

Analysen av kapselns hydromekaniska utveckling efter en skada är omgärdad av stora osäkerheter. Fastän rimliga och pessimistiska uppskattningar kan göras redan idag av det fåtal faktorer som används i beräkningen av radionuklidtransport är det angeläget att förbättra förståelsen av den hydromekaniska utvecklingen.

Bränsle: En annan osäker faktor är bränsleupplösningen. Inverkan av osäkerheter i bränsleupplösningshastighet är begränsad för de allra flesta nuklider.

Även ett helt orealistiskt antagande om en omedelbar bränsleupplösning ger begränsade effekter med i övrigt rimliga data. De enskilda nuklidernas lösligheter begränsar utsläppet. Det viktigaste undantaget är Ra-226 och effekten blir märkbar först efter mer än 100 000 år.

Det är angeläget att skapa en bättre teoretisk och experimentell förståelse för bränsleupplösningssprocessen.

Buffert: Effekterna av osäkerheter kring buffertens egenskaper vad gäller radionuklidtransport är små. Förutsatt att bufferten långsiktigt utvecklas som i basscenariot är förståelsen för buffertens roll för radionuklidtransporten god.

Återfyllning: Osäkerheter kring återfyllningsmaterialens påverkan på det totala utsläppet av radionuklider från närområdet är små. Slutsatsen måste prövas mot resultatet av mer detaljerade analyser av återfyllningsmaterialens långsiktiga utveckling och funktion i allmänhet. Behovet av sådana analyser påpekas i resultatdiskussionen för basscenariot.

Geosfären: De enkla osäkerhetsanalyserna visar att den naturliga variabiliteten i F-faktorn i geosfären ger de största effekterna på beräkningsresultatet (maxdos över en miljon år). Även osäkerheter i sorptions- och matrisdiffusionsegenskaperna spelar roll för retentionen, men är av mindre betydelse än flödesegenskaperna. Resultaten pekar på viktiga förhållanden i berggrunden att bestämma vid en platsundersökning.

Metoderna för bestämning av F-faktorn kan förbättras. Experiment inom t ex TRUE-projekten /Winberg ed, 1999/ och simuleringar med alternativa beskrivningar av berget kan förbättra möjligheterna att bedöma denna avgörande parameter. Sannolikt kan dessa arbeten visa att de nu föreslagna pessimistiska värdena är alltför låga.

Sprickstrukturen och de hydrauliska egenskaperna kring enskilda deponeringshål hanteras i SR 97 pessimistiskt. Bl a har en mindre spricka antagits skära varje deponeringshål mitt för skadan i kapselns kopparhölje. Inga deponeringshål har valts bort till följd av de hydrauliska beräkningarna. Vid en verklig förvaringsplats med borrade deponeringshål skulle aktiva val baseras på observationer i deponeringshålet och beräkningar kunna förbättra resultatet av analysen. Genom aktiva val i en liten skala kan också storskaliga skillnader mellan olika platser utjämnas. Detta skulle kräva en metod för urval som visats fungera under realistiska fältförhållanden.

Biosfären: En viktig förbättring av underlaget till analysen bör kunna åstadkommas med en förbättrad biosfärmodellering. Slutsatsen är egentligen inte baserad på den faktor tio som skiljer de rimliga värdena från de pessimistiska, sådana skillnader är troligen oundvikliga. Snarare är det bedömningen att redan de rimliga värdena troligen ofta är grovt överskattade som motiverar vidare arbete med biosfärmodellerna.

De högsta EDF-värdena för många radionuklider fås för torv och jordbruksmark, vilket inte är i överensstämmelse med tidigare säkerhetsanalyser t ex SITE-94 /SKI, 1996/ och TILA-99 /Vieno och Nordman, 1999/ där spridningsvägen via brunn har ansetts ge det dominerande dosbidraget. Torvens och jordbruksmarkens förmågor att ackumulera radionuklider är grunden till de höga EDF-värdena. Modelleringen av EDF-värden i SR 97 är dock förenklad och sannolikt överdrivet pessimistisk. Det meningsfulla i att beräkna doskonsekvenser hundratusentals år in i framtiden kan också ifrågasättas. Alternativa säkerhetsindikatorer, som aktivitetsutsläpp, kan vara mer meningsfulla eftersom man genom dessa kan avgöra om förvaret kommer att innebära ett generellt miljöproblem eller inte.

Risikanalysen är genomförd med en metod som möjliggör probabilistiska beräkningar trots ett begränsat statistiskt underlag. Det är angeläget att metoden utvärderas inför kommande analyser.

Miljöskydd

Enligt Strålskyddsinstitutets föreskrifter ska även påverkan på ekosystemen kring förvaret redovisas. Inga specifika metoder för detta finns idag utvecklade.

I de allra flesta beräkningsfallen i kapseldefektscenariot ligger doserna många tiopotenser under bakgrundstrålningen. Baserat på detta görs den generella bedömningen att ekosystemen vid Aberg, Beberg och Ceberg inte påverkas negativt av radionuklidspridningen i kapseldefektscenariot.

9.12 Referenser

Ahlbom K, Andersson J-E, Andersson P, Ittner T, Ljunggren C, Tirén S, 1992. Finnsjön Study Site. Scope of activities and main results. SKB TR 92-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Agrenius L, 1999. Kriticitetsförhållanden i kapslar för slutförvaring av använt kärnbränsle. SKB R-99-52. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Allard B, Karlsson F, Neretnieks I, 1991. Concentrations of particulate matter and humic substances in deep groundwaters and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides. SKB TR 91-50. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Amaya T, Chiba T, Suzuki K, Oda C, Yoshikawa H, Yui M, 1997. Solubility of Sn(IV) oxide in dilute NaClO₄ solution at ambient temperature. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 465. pp 751–758.

- Andersson J, Hermansson J, Elert M, Gylling B, Moreno L, Selroos J-O, 1998.** Derivation and treatment of the flow wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP32 for use in safety assessment. SKB R-98-60. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J, Riggare P, Skagius K, 1998a.** Project SAFE – Update of the SFR-1 safety assessment Phase 1. SKB R-98-43. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J, Riggare P, Skagius K, 1998b.** Project SAFE – Update of the SFR-1 safety assessment Phase 1 Appendices. SKB R-98-44. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Anttila M, 1992.** Spent fuel characteristics for TVO-92 safety analysis. Report YJT-92-03. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Finland (på finska).
- Bergman B, Walker D, 1998.** The relationship between stochastic anisotropy and hydraulic anisotropy. Numerical experiments using HYDRASTAR 1.7.2. SKB PR U-98-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bergström U, Edlund O, Evans S, Rödger B, 1982.** BIOPATH – A computer code for calculation of the turnover of nuclides in the biosphere and the resulting doses to man. STUDSVIK/NW-82/261, Studsvik AB, Sverige.
- Bergström U, Nordlinder S, Aggeryd I, 1999.** Models for dose assessments – Modules for various biosphere types. SKB TR-99-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Berner U, 1994.** Kristallin-I: Estimates of solubility limits for safety relevant radionuclides. Nagra Technical Report NTB 94-08. Nagra, Switzerland.
- BIOMOVS, 1993.** Final report. BIOMOVS Technical report 15. Statens strålskyddsinstitut (SSI), Stockholm.
- BIOMOVS II, 1996.** An overview of the study and its findings. BIOMOVS II Technical Report 17. Statens strålskyddsinstitut (SSI), Stockholm.
- Birgersson L, Neretnieks I, 1988.** Diffusion in the matrix of granitic rock. Field test in the Stripa Mine. Final report. SKB TR 88-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Blackwood D J, Hoch A R, Naish C C, Rance A A, Sharland S M, 1994.** Research on corrosion aspects of the Advanced Cold Process Canister. SKB TR 94-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bond A E, Hoch A R, 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.
- 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, Cera E, Duro L, Pon, J, de Pablo J, Eriksen T, 1998.

Development of a kinetic model for the dissolution of the UO₂ spent nuclear fuel. Application of the model to the minor radionuclides. SKB TR-98-22. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Carbol P, Engkvist I, 1995. Sorption och sorptionsmodeller – Tillämpningar och begränsningar i säkerhetsanalys. SKB AR 95-26. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Carbol P, Engkvist I, 1997. Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB R-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Carslaw H S, Jaeger J C, 1959. Conduction of heat in solids. New York, Oxford University Press, pp 336.

Carver M B, Hanley D V, Chaplin K R, 1979. "Macksima-Chemist". A program for mass action kinetics simulation by automatic chemical equation manipulation and integration using stiff techniques. AECL 6413. AECL, Canada.

Dershowitz B, Eiben T, Follin S, Andersson J, 1999. SR 97 Alternative Models Project: Discrete fracture network modeling for performance assessment of Aberg. SKB R-99-43. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Draganic Z D m fl, 1991. Radiat. Phys: Chem, Vol 38, No 2, 1991, 317–21.

Ek J, Evans S, Ljungqvist L, 1982. Variation in radioactivity, uranium and radium-226 contents i three radioactive springs and along their out-flows northern Sweden. SKBF/KBS TR 82-13. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

Elert M, Neretnieks I, Kjellbert N, Ström A, 1992. Description of the transport mechanisms and pathways in the far field of a KBS-3 type repository. SKB TR 92-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Elert M, 1997. Retention mechanisms and the flow wetted surface – implications for safety analysis. SKB TR 97-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Elert M, 1999. Evaluation of modelling of radially converging and dipole tests with conservative tracers. The Äspö task force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Tasks 4C and 4D. SKB TR-99-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Eriksen T, 1996. Radiolysis of water within a ruptured fuel element. SKB PR U-96-29. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Eriksen T, 1999. Radiolysis of water within a ruptured fuel element. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S, 1999. Hydrogeological boundary settings in SR 97. Uncertainties in regional boundary settings and transfer of boundary conditions to site-scale models. SKB R-99-45. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gardner R H, Røjder B, Bergström I, 1983. PRISM – A systematic method for determining the effect of parameter uncertainties on model predictions. STUDSVIK/NW-83/555, Studsvik AB.

Gimenez L, 1996. Dissertation, Universitat de Barcelona.

Gnirk P, 1993. OECD/NEA International Stripa Project. Overview volume II. Natural barriers. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafson G, Ström A, 1995. The Äspö task force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Evaluation report on Task No 1, the LPT2 large scale field experiments. SKB ICR 95-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gylling B, Walker D, Hartley L, 1999a. Site-scale groundwater flow modelling of Beberg. SKB TR-99-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gylling B, Moreno L, Neretnieks I, 1999b. SR 97 Alternative Models Project: Performance assessment using CHAN3D. SKB R-99-44. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hartley L, Boghammar A, Grundfelt B, 1998. Investigation of the large scale regional hydrogeological situation at Beberg. SKB TR-98-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hedin A, 1997. Använt kärnbränsle – hur farligt är det? En delrapport från projektet ”Beskrivning av risk”. SKB R-97-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hedin A, 1999. An analytic model for radionuclide releases in the near-field. SKB Internal PM 1999. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hicks T W, Green T H, 1999. A review of the treatment of criticality in post-closure safety assessment of radioactive waste disposal. Environment Agency R&D Technical Report P222.

Hofmann B A, 1989. Geochemical analogue study in the Krunkelbach mine, Menzenschwand, Southern Germany: geology and water-rock interaction. Materials Research Society, Proceedings 127, XII, pp 921–926.

Horseman, S T, Harrington J F, Sellin P, 1997. Gas migration in MX-80 buffer bentonite. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 465. pp 1003–1010.

Johansson H, Byegård J, Skarnemark G, Skälberg M, 1996. Matrix diffusion of some alkali- and alkaline earth-metals in granitic rock. Proceedings Materials Research Society, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 1996 Fall Meeting, Boston, Massachusetts.

Johnson L H, Tait J C, 1997. Release of segregated nuclides from spent fuel. SKB TR 97-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kersting A B, Efurd D W, Finnegan D L, Rokop D K, Thompson J L, 1999. Migration of plutonium in groundwater at the Nevada Test Site. Nature, Vol 397, pp 56–59.

- Laaksoharju M, Degueldre C, Skärman C, 1995.** Studies of colloids and their importance for repository performance assessment. SKB TR 95-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindgren M, Widén H, 1998.** Discretization in COMP23 for SR97. SKB R-98-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindgren M, Lindström F, 1999.** SR 97 – Radionuclide transport calculations. SKB TR-99-23. Svensk Kärnbränslehantering.
- Luszczynski N J, 1961.** Head and flow of ground water of variable density. Journal of Geophysical Research, 66(12), 4247–4256.
- Marsic N, Hartley L, 1999.** Modelling of the site scale hydrogeological situation at Beberg using NAMMU. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Miekeley N, Couthino de Jesus H, Porto da Silveira, Degueldre C, 1992.** Chemical and physical characterisation of suspended particles and colloids in waters from Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. Journal of Geochemical Exploration, Vol 45, pp 409–437.
- Miller W, Alexander R, Chapman N, McKinley I, Smellie J, 1994.** Natural analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes, Elsevier, Amsterdam.
- Moreno L, Gylling B, Neretnieks I, 1995.** Solute transport in fractured media. The important mechanisms for performance assessment. SKB TR 95-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Gylling B, 1998.** Equivalent flow rate concept in near field transport model COMP23. Proposed values for SR 97. SKB R-98-53. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, 1999.** Impact of the water flow rate in the tunnel on the release of radionuclides. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Morris S T, Cliffe K A, 1994.** Verification of HYDRASTAR: Analysis of hydraulic conductivity fields and dispersion. SKB TR 94-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Sandstedt H, Niland L, 1997.** Förslag till principiella utformningar av förvar enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg. SKB R-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- NEA/SKI, 1996.** Developing groundwater flow and transport models for radioactive waste disposal. Six years of experience from the INTRAVAL project, OECD Nuclear Energy Agency, Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.
- NEA, 1999.** Confidence in the long-term safety of deep geological repositories. Its development and communication. Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD/NEA).

Neretnieks I, 1979. Transport mechanism and rates of transport of radionuclides in the geosphere as related to the Swedish KBS-concept. Proc. Symp. Underground Disposal of Radioactive Wastes, Otaniemi, Finland, July 2–6, 1979, Vol II. p 108, International Atomic Energy Agency.

Neretnieks I, 1980. Diffusion in the rock matrix: An important factor in radionuclide retardation? J Geophysical Research, vol 85, no B8, pp 4379–4397.

Neretnieks I, 1993. Solute transport in fractured rock – Applications to radionuclide waste repositories, in ed Bear J, Tsang C-F, de Marsily G, Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press, Inc.

Nordlinder S, Bergström U, Mathiasson L, 1999. Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Norman S, Kjellbert N, 1990. FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package. SKB TR 90-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Norman S, 1991. Verification of HYDRASTAR – A code for stochastic continuum simulation of groundwater flow. SKB TR 91-27. Svensk Kärnbränslehantering AB.

NRC/SKI, 1999. Regulatory perspectives on model validation in high-level radioactive waste management programs: A joint NRC/SKI White Paper. NUREG-1636, US Nuclear Regulatory Commission.

Ochs M, 1997. Review of a report on diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite. SKB R-97-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ohlsson Y, Neretnieks I, 1997. Diffusion data in granite. Recommended values. SKB TR 97-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Olin M, Lehtikoinen J, 1997. Application of surface complexation modelling: Nickel sorption on quartz, manganese oxide, kaolinite and goethite, and thorium on silica. POSIVA 97-10. Posiva Oy, Finland.

Olsson O, Neretnieks I, Cvetkovic V, 1995. Deliberations on radionuclide transport and rationale for tracer transport experiments to be performed at Äspö. A selection of papers. SKB HRL PR 25-95-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Olsson O, Gale J E, 1995. Site assessment and characterization for high-level nuclear waste disposal: results from the Stripa Project, Sweden, Quarterly Journal of Engineering Geology, vol 28, suppl 1, pp S17–S30.

Puigdoménech I, Bruno J, 1991. Plutonium solubilities. SKB TR 91-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Punshon C S, 1997. EB welding of thick section copper for nuclear waste encapsulation – Definition of imperfection types and formation mechanisms. 220279/1197, TWI, Abington Hall, Abington, United Kingdom.

- Pusch R, Ranhagen L, Nilden K, 1985.** Gas migration through MX-80 bentonite. Nagra Technical Report. NTB 85-36. Nagra, Switzerland.
- Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997.** Äspö Hard Rock Laboratory – Geoscientific Evaluation 1997/5. Models based on site characterisation 1986–1995. SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rodwell W, Harris A, Horseman S, Lalioux P, Müller W, Ortiz Amaya L, Preuss K, 1999.** Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste. EC/NEA Status Report.
- Romero L, 1995.** The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste. PhD Thesis, TRITA-KET R21, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.
- Romero L, Thompson A, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Boghammar A, Thompson A, 1999.** COMP23, Nucltran users's guide. PROPER Version 1.1.6. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ross A B m fl, 1992.** NDRL-NIST Solution Kinetics Database Ver. 1.
- Saksa P, Nummela J, 1998.** Geological-structural models used in SR 97. Uncertainty analysis. SKB TR-98-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shoosmith D, Sunder S, 1992.** The prediction of nuclear fuel dissolution rates under waste disposal conditions. J. Nucl. Mater. 190, 20–35.
- Skagius K, Neretnieks I, 1985.** Porosities and diffusivities of some non-sorbing species in crystalline rocks. SKB TR 85-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Skagius K, 1986.** Diffusion of dissolved species in the matrix of some Swedish crystalline rocks. PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3, IV Säkerhet. Svensk Kärnbränsleförsörjning/Avd KBS.
- SKB, 1992.** SKB 91 – Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Berggrundens betydelse för säkerheten. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1995.** SR 95 – Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKI, 1996.** SKI SITE-94, Deep repository performance assessment project. SKI Report 96:36. Statens kärnkraftinspektion.
- Svensson U, 1997a.** A regional analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area. SKB TR 97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Svensson U, 1997b.** A site scale analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area.
SKB TR 97-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 1999.** A numerical simulation of the origin and composition of the groundwater below Äspö.
SKB R-99-39. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Takase H, Benbow, S, Grindrod P, 1999.** Mechanical failure of SKB spent fuel disposal canisters – mathematical modelling and scoping calculations.
SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tanai K, Kanno T, Gallé C, 1997.** Experimental study of gas permeabilities and breakthrough pressures in clays. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 465. pp 995–1002.
- Torrero L, 1995.** Study of the UO₂ dissolution as a chemical analogue to the spent fuel matrix. Dissertation; Universidad Politénica de Catalunya, Barcelona.
- Vieno T, Hautojärvi A, Koskinen L, Nordman H, 1992.** TVO-92 Safety analysis of spent fuel disposal.
Report YJT-92-33. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Finland.
- Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, TILA-99.
POSIVA 99-07. Posiva Oy, Finland.
- Walker D (ed), Eriksson L, Lovius L, 1996.** Analysis of the Äspö LPT2 pumping test via simulation and inverse modelling with HYDRASTAR.
SKB TR 96-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg.
SKB TR-97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Walker D, Gylling B, 1998.** Site-scale groundwater flow modelling of Aberg.
SKB TR-98-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Walker D, Gylling B, 1999.** Site-scale groundwater flow modelling of Ceberg.
SKB TR-99-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- IAEA, 1996.** Validation of models using Chernobyl fallout data from southern Finland. Scenario S. Second report of the VAMP Multiple Pathways Assessment Working Group. IAEA-TECDOC-904, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- Werme L, Sellin P, Forsyth R, 1990.** Radiolytically induced oxidative dissolution of spent nuclear fuel.
SKB TR 90-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle.
SKB R-98-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Widén H, Walker D, 1999.** SR 97 Alternative modelling project: Stochastic continuum modelling of Aberg.
SKB R-99-42. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wikramaratna R S, Goodfield M, Rodwell W R, Nash P J, Agg P J, 1993.

A preliminary assessment of gas migration from the Copper/Steel Canister.
SKB TR 93-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Winberg A (ed), 1999. Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments. Äspölaboratoriet.

SKB ICR 99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Yu J-W, Neretnieks I, 1997. Diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite.

SKB TR 97-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.

10 Klimatscenario

10.1 Inledning

Säkerhetsanalysen omfattar långa tidsperioder, upp till 100 000 år och längre. I dessa tidsperspektiv förväntas stora klimatförändringar. I Skandinavien har långsiktiga klimatförändringar tidigare medfört utbredning av permafrost och inlandsisar. Förändringar liknande dem i det förgångna förväntas även i framtiden.

Klimatscenariot omfattar en kort beskrivning av jordens klimatsystem, samt omfattningen av de klimatförändringar vi kan förvänta i hundratusenåriga tidsperspektiv. Den framtidsbild som målas upp baserar sig på ett antal relativt enkla modeller.

Beskrivningen av klimatförhållandena utgår från tre så kallade klimatstyrda processtillstånd:

- Tempererat/borealt tillstånd.
- Permafrosttillstånd.
- Glacialt tillstånd.

Inom varje tillstånd beskrivs karakteristiska förhållanden och hur de påverkar förvaret. För att ge en mer detaljerad bild delas tillstånden in i så kallade regimer. Indelningen har gjorts mot bakgrund av de förhållanden som har störst betydelse för djupförvaret. Utvecklingen av klimatet ses som en variation av tillståndens och regimernas utbredning i tid och rum. De klimatstyrda processtillstånden och regimerna ska ge en generell bild av förhållandena. Inga strikta gränser mellan olika tillstånd har definierats, i verkligheten är övergången mellan olika tillstånd och regimer successiv.

Påverkan på förvarets utveckling beskrivs i första hand i relation till basscenariot. Syftet är att visa hur de omfattande förändringarna på ytan påverkar miljön på förvarsdjup. Klimatförändringarna kommer att påverka transporten av radionuklider, främst i biosfären men även i geosfären. För att belysa betydelsen av detta görs en jämförelse med kapseldefektscenariot.

10.2 Initialtillstånd

För att analysera hur klimatförändringarna inverkar på förvarets förmåga att isolera det använda bränslet antas samma initialtillstånd som i basscenariot, dvs förvaret är byggt enligt specifikationer och alla kapslar är intakta.

För analys av påverkan på radionuklidtransport genom förvaret antas samma initialtillstånd som i kapseldefektscenariot, dvs ett fåtal kapslar har tillverkningsfel och förvaret är i övrigt byggt enligt specifikationer.

10.3 Randförhållanden

10.3.1 Jordens klimatsystem

Klimat är en beskrivning av de meteorologiska förhållandena inom ett område begränsat i tid och/eller rum. Klimatet beskrivs genom de statistiska egenskaperna hos olika klimatparametrar t ex medel-, max- och minvärden av temperatur, luftfuktighet, lufttryck, vindhastighet och nederbörd.

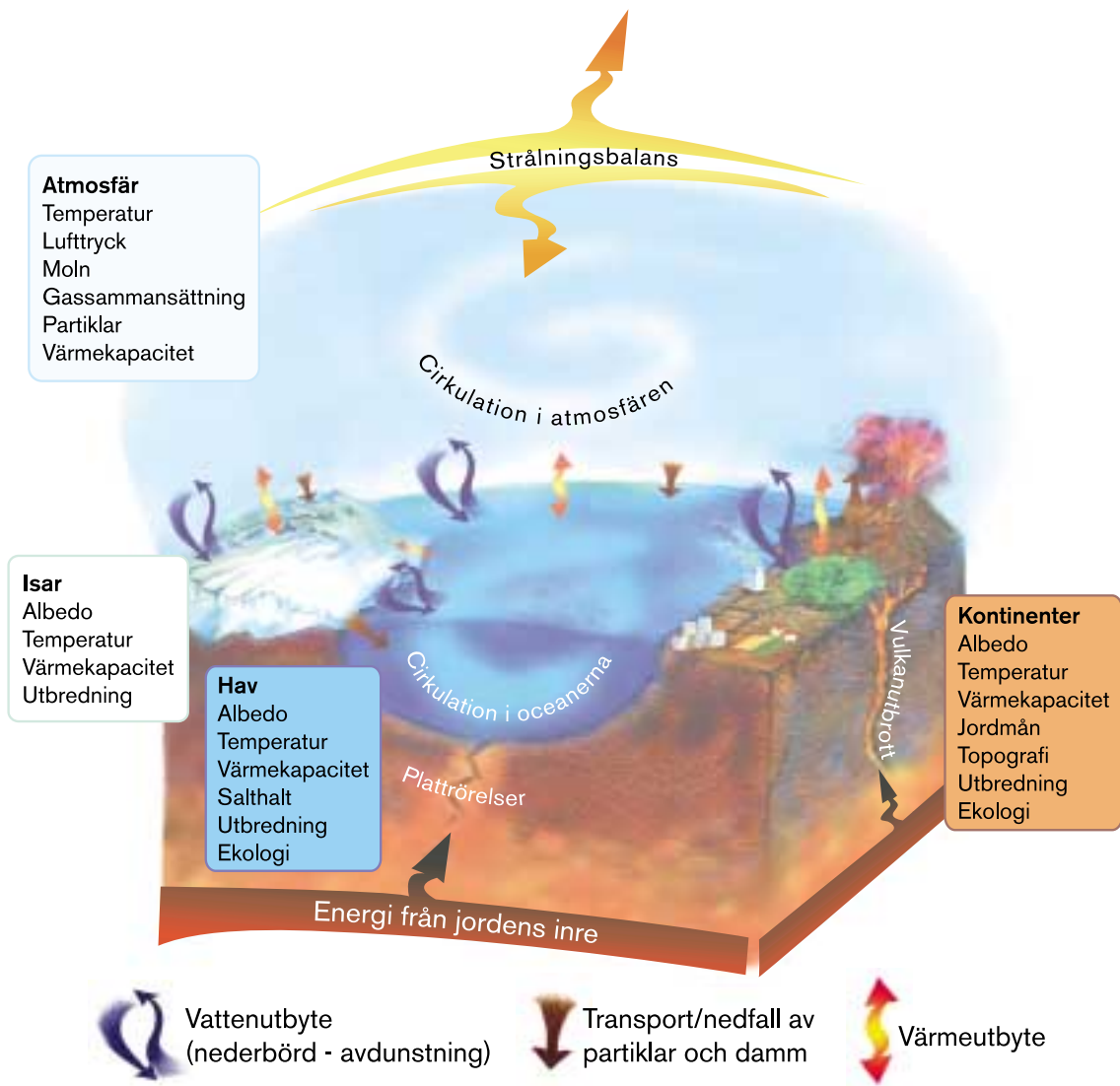
Jordens klimat beror av strålningsbalansen, dvs förhållandet mellan inkommande kortvågig solstrålning och utgående långvågig strålning, samt av värmetransport genom cirkulation i atmosfären och oceanerna. De dominerande orsakerna till att klimatet varierar över jordytan är att intensiteten i solinstrålningen varierar med breddgraden, samt att kontinenter och hav värms på olika sätt av solinstrålningen. Klimatet är en följd av den ojämn uppvärmningen och de värmeöverföringsmekanismer den ger upphov till.

Atmosfären, oceanerna, inlandsisar och glaciärer, biosfären och ytan av litosfären, är alla komponenter i jordens klimatsystem. Komponenterna i klimatsystemet växelverkar med varandra och flera interna återkopplingar och beroenden förekommer. Utifrån påverkas klimatsystemet av solinstrålningen och energi från jordens inre.

Klimatsystemet är mycket komplext och har också ett inslag av slumpmässighet. Dess inre dynamik påverkar i sig klimatet. Klimatsystemets tillstånd och dynamik bestämmer också hur klimatet förändras vid en yttre förändring. Återkopplingsmekanismer inom klimatsystemet kan förstärka eller försvaga effekten av en yttre förändring. En översiktlig beskrivning av klimatsystemet och dess komponenter ges i figur 10-1.

De senaste 20–30 åren har kunskapen om jordens klimat och klimatsystem ökat betydligt. Utveckling av provtagnings- och mätteknik har lett till att geologiska och biologiska arkiv¹ som bär spår av gångna tiders klimat blivit tillgängliga. Utvecklingen av datortekniken har gjort det möjligt att simulera klimatsystemet. Insamling och analys av klimatdata har både utökats och förbättrats. Trots det kan vi idag inte fullt ut beskriva jordens klimatsystem och orsakerna till klimatförändringar.

¹ Till exempel lössjord, stalagmiter, djuphavs- och sjösediment, iskärnor och träd innehåller olika typer av data som vittnar om gångna tiders klimat. Exempel på data är avlagringarnas och årsringarnas tjocklek, samt innehåll och sammansättning av olika radioaktiva och stabila isotoper, pollen och innesluten gas. Ett s k arkiv, t ex en iskärna, kan innehålla flera olika data.

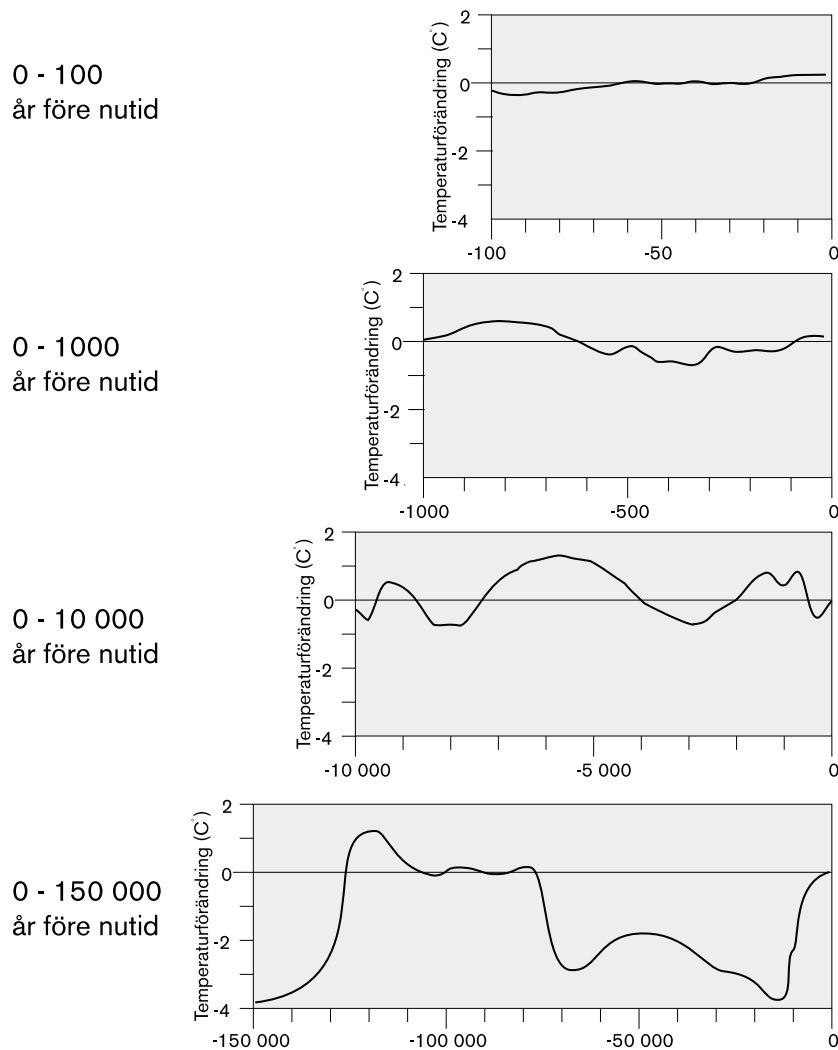


Figur 10-1. Komponenterna i jordens klimatsystem och några av deras egenskaper. Klimatet bestäms av komponenternas egenskaper samt av hur de förändras genom interna processer och växelverkan mellan delarna. Utifrån påverkas klimatsystemet av solinstrålningen och energi från jordens inre.

10.3.2 Klimatförändringar

Historiska klimatförändringar har varit cykliska där cykler med olika frekvens och amplitud överlagrats. Olika geologiska och biologiska arkiv visar att både stora och snabba klimatförändringar förekommit i det förgångna. Omfattningen av globala temperaturförändringar i några olika tidsperspektiv visas i figur 10-2.

Klimatet kan förändras om någon av klimatsystemets komponenter förändras, eller av yttre orsaker som förändringar av den inkommande solinstrålningen eller påverkan av energi från jordens inre genom vulkanutbrott och platttektoniska rörelser. Olika yttre och interna förändringar verkar i olika tidsperspektiv och kan förstärka eller motverka varandra.



Figur 10-2. Förändringar av den globala medeltemperaturen i olika tidsperspektiv /bearbetning efter Houghton m fl, 1990/.

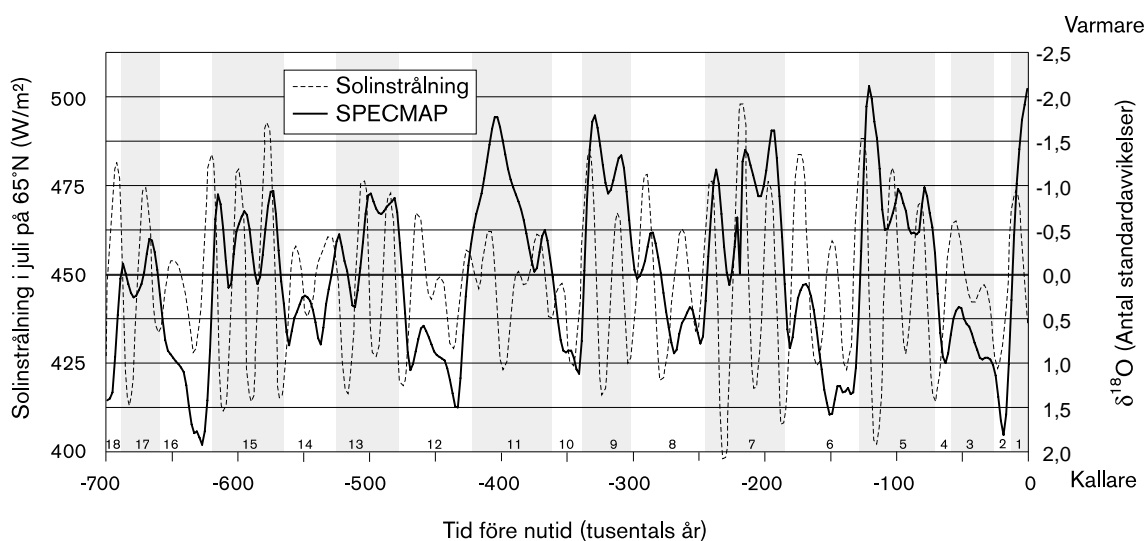
Solinstrålningen varierar med solens aktivitet och med jordens så kallade omloppsparametrar. Omloppsparametrarna är excentricitet, dvs formen på jordens bana runt solen; jordaxelns lutning; och precession, dvs det fenomen som får axeln på en snurrande kropp att röra sig på en konisk yta kring lodlinjen /Larsson-Leander, 1977/. Precessionen påverkar den tid på året jorden befinner sig närmast solen. Omloppsparametrarna varierar cykliskt med perioder på tio- till hundratusentals år /Berger och Loutre, 1991/. Astronomen Milankovitch beräknade omloppsparametrarnas variation samt hur de påverkar solinstrålningen till jorden. Milankovitch menade att variationen av solinstrålningen driver klimatförändringarna på jorden /Milankovitch, 1941 (1969) i Berger, 1988/.

Sedan 40-talet då Milankovitch lade fram sin teori om klimatförändringar har flera geologiska arkiv som täcker långa tidsperioder blivit tillgängliga. En viktig kategori arkiv är den insamling och analys av djuphavssediment som gjordes inom projektet SPECMAP (Spectral Mapping Project) /Imbrie m fl, 1984/. Förhållandet mellan de stabila syreisotoperna O-18 och O-16 i resterna av plankton som återfinns i djuphavssediment avspeglar hur stor volym vatten som varit bundet i inlandsisar jorden över. Variationer

i förhållandet mellan syreisotoperna benämns $\delta^{18}\text{O}$. Höga $\delta^{18}\text{O}$ -värden avspeglar ett kallt klimat och låga värden innebär ett varmt klimat². Signalanalys av $\delta^{18}\text{O}$ -värdenas variation avslöjar samma dominerande periodiciteter som omloppsparametrarna. Det råder ett linjärt förhållande mellan $\delta^{18}\text{O}$ -variationen och effekterna av precessionen samt jordaxelns lutning. Variationerna är periodiska med dominerande periodiciteter på cirka 20 000 år respektive cirka 40 000 år. Dessa båda periodiciteter dominerar variationen av solinstrålningen. $\delta^{18}\text{O}$ -spektrat domineras däremot av periodiciteter på runt hundratusen år. Excentriciteten har likartad periodicitet men mycket liten betydelse för solinstrålningen. Förhållandet mellan $\delta^{18}\text{O}$ och excentriciteten är icke linjärt /Hays m fl, 1976/. Variationen av $\delta^{18}\text{O}$ och solinstrålningen under de senaste 700 000 åren visas i figur 10-3.

Idag är de flesta klimatforskare eniga om att det är variationer i solinstrålningen på grund av variationer i omloppsparametrarna som har föranlett kvartärtidens övergångar mellan globala varm- och kallperioder. Variationer i solinstrålningen kan dock inte helt förklara klimatförändringarna som geologiska arkiv avslöjar, någon form av förstärkningsmekanismer måste förekomma i klimatsystemet. Det gäller speciellt hundratusenårscykeln som dominerat de senaste 400 000–900 000 åren /Holmgren och Karlén, 1998/.

Klimatsystemets respons på en yttre förändring påverkas av komponenternas inre dynamik och responshastigheter. Variationerna av solens instrålning säger ungefär när vi kan förvänta större klimatförändringar. För att beskriva omfattningen av klimatförändringarna krävs även en beskrivning av klimatsystemets respons på den yttre förändringen. Variationen av solinstrålningen kan beräknas med hög precision, kunskapen om klimatsystemet är dock inte tillräcklig för att med någon större säkerhet simulera den resulterande utvecklingen av klimatet.



Figur 10-3. $\delta^{18}\text{O}$ -variationer från 5 borrhärdor av djuphavssediment uttryckt som antal standardavvikelser /ur Imbrie m fl, 1984/ samt variation av solinstrålningen i juli på 65 °N /ur Berger och Loutre, 1991/. De grå och vita fälten och siffrorna i underkanten markerar kall- och varmperioder, s k isotopiska skeden /enligt Imbrie m fl, 1984/.

² Vid kallt klimat ökar andelen av den tyngre syreisotopen, O-18, i oceanerna. Den lättare isotopen, O-16, avdunstar lättare och binds som snö och is i inlandsisarna. Förhållandet mellan syreisotoperna uttrycks i promille, vanligen enligt en standard (SMOW) som: $\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{prov}}/R_{\text{ref}} - 1) \cdot 1000$ där $R_{\text{prov}} = \text{O-18/O-16}$ i sedimentet och R_{ref} är ett referensvärde för motsvarande kvot.

10.3.3 En möjlig klimatutveckling de kommande 150 000 åren

För att belysa klimatförhållandenas inverkan på djupförvaret har ett klimatscenario formulerats /Morén och Pässe, 1999/. Klimatscenariot grundar sig på beskrivningar av gångna tiders klimatutveckling, samt på modellberäkningar av framtida förhållanden. Det avser i första hand att beskriva utvecklingen de kommande 150 000 åren, men beskriver principiellt klimatutvecklingen under ännu längre tid.

Under kvartärtiden, de senaste två miljoner åren, har jordens klimat karakteriserats av globala kallperioder då inlandsisar och glaciärer vuxit till. Kallperioderna har avlösts av kortare varmperioder med klimat liknande dagens. Kallperioderna benämns glacialer, och varmperioderna kallas interglacialer. Glacialerna innehåller kallare och varmare skeden, s k stadialer respektive interstadialer. Den paleoklimatologiska indelningen i kall- och varmperioder baserar sig på analys av $\delta^{18}\text{O}$ i djuphavssediment (figur 10-3) /Imbrie m fl, 1984; Martinson m fl, 1987/. Indelningen avspeglar brytpunkter i dessa dataserier, som avbildar den globala isvolymen. Resultatet, en indelning i s k isotopiska skeden, kan ses som en tidsskala över globala klimatförändringar. En övergång mellan en glacial (kallperiod) och interglacial (varmperiod) är således inte detsamma som en övergång mellan nedisade och isfria förhållanden i Skandinavien. Vid övergången till nuvarande interglaciala period, som daterats till 12 000 år tillbaka i tiden, var t ex stora delar av Sverige fortfarande täckt av is. Under en period som benämns interglacial (varmperiod) kan således glacialt tillstånd råda i delar av Sverige. På motsvarande sätt kan förhållandena i delar av landet vara tempererade/boreala under stadialer (kallperioder).

De senaste cirka 900 000 åren upprepas ett mönster med cirka 100 000 år långa glacialer, abrupt avslutade med en övergång till ett varmt klimat. Stadialerna mot slutet av en glacial tenderar att vara de kallaste, de avslutas plötsligt med en snabb övergång till interglaciala förhållanden. Detta "sågtandsmönster" med ett successivt allt kallare klimat följt av en snabb övergång till varma förhållanden är särskilt tydligt de senaste cirka 400 000 åren, se figur 10-3.

Under glaciala perioder har inlandsisens utbredning över Skandinavien varierat. Under de varmare skedena, interstadialerna, kan istäckets utbredning ha begränsat sig till fjällkedjan. Sydost om isen kan förhållandena successivt ha övergått från permafrost till tempererat tillstånd. Under kalla skeden, stadialer, kan isen ha täckt stora delar av Sverige och Finland, för att under de mest extrema kallperioderna ha nått in över Ryssland i öst och ned till Tyskland och Polen i söder.

Människan påverkar klimatet genom markanvändning och genom utsläpp av växthusgaser. Analys av en is kärna från Antarktis visar att de nuvarande koncentrationerna av växthusgaserna koldioxid och metan i atmosfären är de högsta som förekommit de senaste 420 000 åren. De nuvarande halterna är extremt höga i förhållande till mätseriens övriga varmperioder /Petit m fl, 1999/. Vilken betydelse människans aktiviteter har för de höga halterna växthusgaser och hur de påverkar klimatutvecklingen är dock inte fastlagt idag.

Klimatscenariot för SR 97 /Morén och Pässe, 1999/ avser att beskriva utvecklingen under en glacial/interglacial cykel. De karakteristiska förändringar man kan se under en sådan cykel kan förväntas upprepa sig mycket långt in i framtiden även om dominerande periodicitet och omfattning kan komma att variera. Förändringar som kan komma att bryta det mönster med upprepade kallperioder vi sett under kvartärtiden är t ex platttektoniska rörelser som kan förändra kontinenterna och deras lägen så att värmeöverföringsmekanismerna i atmosfär och hav ändras radikalt. Denna typ av förändringar sker i tidsperspektivet flera hundratusentals till miljontals år.

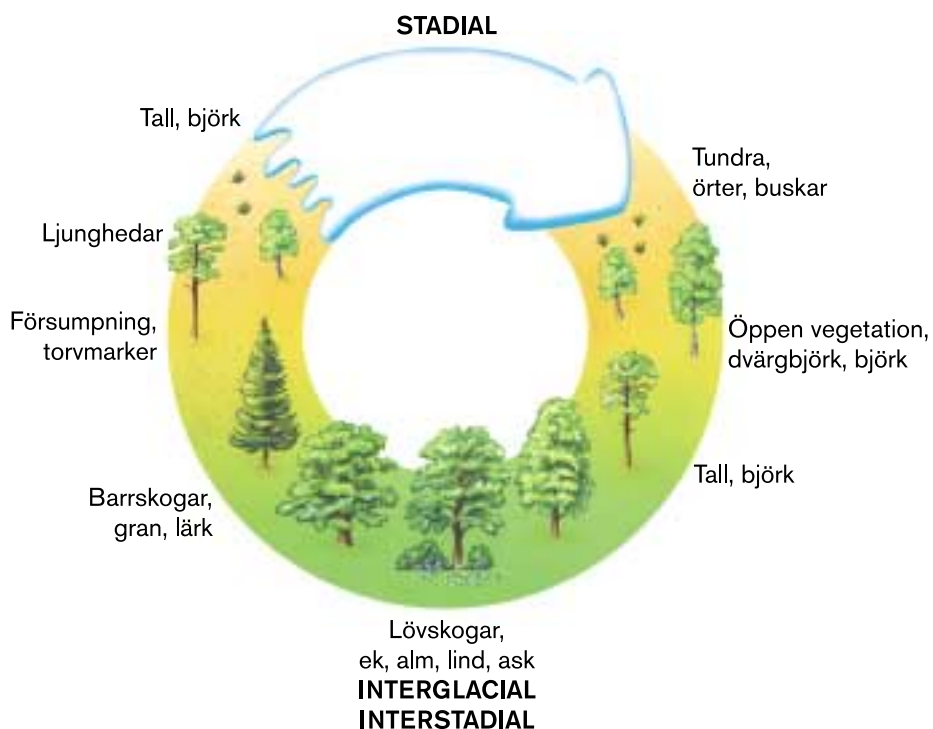
Scenariot över den framtida isutbredningen baserar sig på simuleringar med tre modeller samt rekonstruktioner av förhållandena under den senaste glaciala perioden, Weichsel /Mangerud, 1991/. Modellerna refereras här som ACLIN, Imbrie & Imbrie samt LLN-modellen. ACLIN-modellen (Astronomical Climate Index) /Kukla m fl, 1981/ beräknar ett globalt klimatindex, det är en enkel modell som direkt korrelerar variationer i solinstrålningen till klimatförhållandena. Imbrie & Imbrie-modellen /Imbrie och Imbrie, 1980/ beräknar den globala isvolymen, den innehåller en modell som på ett enkelt sätt tar hänsyn till inlandsisarnas dynamik då variationen i solinstrålningen har satts i relation till klimatförhållandena. I LLN-modellen (Lowain-la-Nueve two-dimension northern hemisphere climate model) /Gallée m fl, 1991; Gallée m fl, 1992/ slutligen görs en tvådimensionell simulering av klimatet på norra halvklotet, beräknade klimatdata används som indata till en glaciärismodell som är kopplad till klimatmodellen. Utbredningen av inlandsisarna på norra halvklotet beräknas, det ger nya randvillkor för en simulering av klimatsystemet, som i sin tur ger nya klimatdata till glaciärismodellen osv.

De närmaste 50 000 åren kommer variationerna i solinstrålningen att vara små, de minsta på tre miljoner år /Berger m fl, 1996/. I resultaten från LLN-modellen som har en enkel, men ändå relativt fullständig beskrivning av klimatsystemet, avspeglas detta med en svag respons i form av isutbredning på det norra halvklotet /Berger m fl, 1996; Berger och Loutre, 1997/. De båda andra – äldre och enklare – modellerna indikerar ett kallare klimat under denna period. Samtliga modeller återskapar förhållandena under den förra glaciala perioden, Weichsel, relativt väl. Scenariot som presenteras här är en subjektiv sammanvägning av resultat från modellerna och utvecklingen under Weichsel /enligt Mangerud, 1991/. Tre varma och tre kalla perioder antas. Under den sista av varmperioderna antas interglaciala förhållanden. Mellan varmperioderna antas isen breda ut sig över Skandinavien, och under den sista och strängaste av kallperioderna antas den nå ända ned till norra Tyskland och Polen.

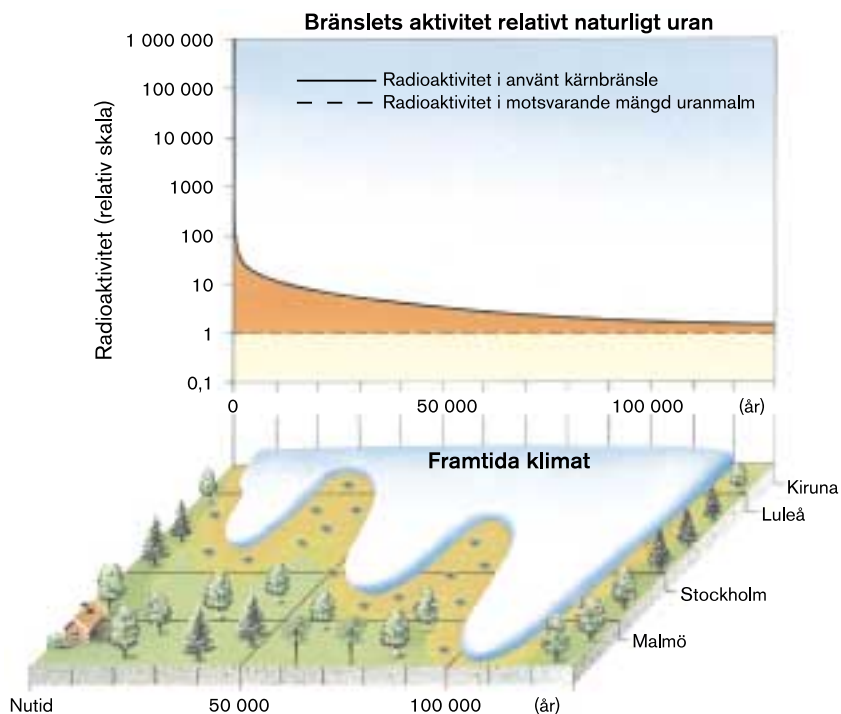
För att ge en geografisk bild av utvecklingen har den antagna isutbredningen använts som indata till en modell som beräknar kustlinjeförskjutningen. Modellen bygger på empiriska data och simulerar kustlinjeförskjutningens isostatiska (nedtryckning och höjning av jordskorpan) och eustatiska (förändring av havsnivån) komponent /Pässe, 1996; Pässe, 1997; Morén och Pässe, 1999/. För att beskriva utbredningen av de olika klimatstyrda processtillstånden har dessutom en modell som simulerar den skandinaviska inlandsisen använts /Boulton och Payne, 1992/. En subjektiv bedömning av utbredningen av permafrost har gjorts baserad på resultat från denna modell, samt nuvarande förhållanden i Nordamerika /French, 1996/.

De förhållanden som råder i biosfären under en viss period påverkas av den tidigare utvecklingen. Jordmånen är påverkad av tidigare nedisningar, av permafrost samt av om platsen varit täckt av vatten. Vegetationen både påverkas av och påverkar jordmånen /Fredén, 1994/. En schematisk skiss över vegetationens förändring med avståndet från isen – både i tid och rum – ges i figur 10-4.

En schematisk illustration av den antagna utvecklingen under nästa glaciala/interglaciala cykel visas i figur 10-5. I övre delen av figur 10-5 visas hur radioaktiviteten i det använda bränslet avtar under samma period. Vid inledningen av nästa interglacial har aktiviteten avtagit till en nivå som motsvarar aktiviteten i den mängd naturligt uran som en gång användes för att tillverka bränslet. En allmän beskrivning av scenariot ges i tabell 10-1. I figur 10-6 slutligen, visas den antagna isutbredningen, samt den beräknade kustlinjen för glacialens tre varma respektive kalla maxima.



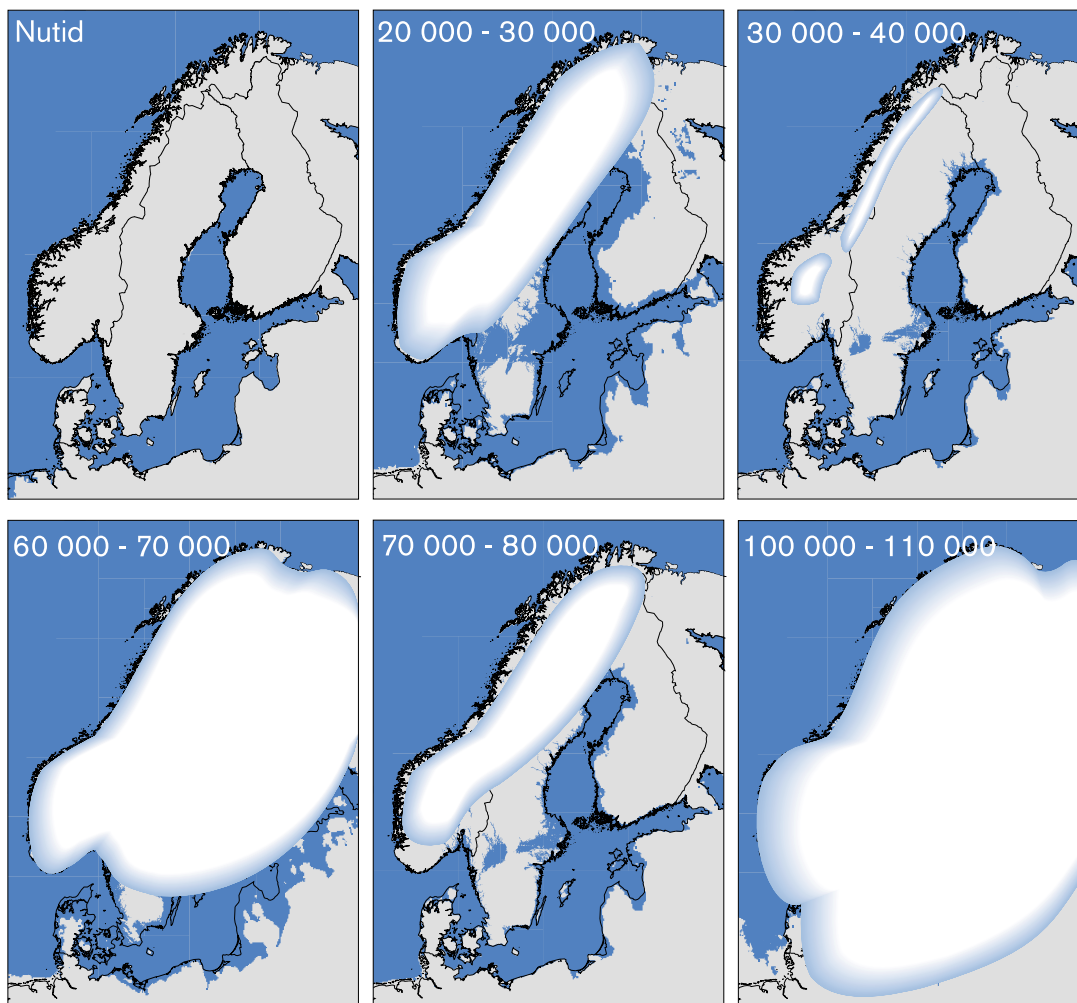
Figur 10-4. Vegetationen förändras med avståndet från isen, både i tid och rum. Vegetationsfaserna avlöser varandra. Deras längd kan variera mellan hundra och mer än tiotusen år, utbredningen kan variera från begränsade områden till i stort sett hela landets yta.



Figur 10-5. Övre delen: Det använda bränslets radioaktivitet som funktion av tiden. Aktiviteten visas i relation till radioaktiviteten i den mängd uran som behövs för att framställa bränslet. Undre delen: Schematisk illustration av isutbredning och vegetation fram till och med nästa interglaciala period.

Tabell 10-1. Ett scenario för klimatrelaterade förhållanden de närmaste 150 000 åren (0 = nutid) /Morén och Pässe, 1999/.

Period (tusen år)	Klimatrelaterade förhållanden
0-5	- Förhållanden liknande dagens
5-20	- Kallperiod, det blir gradvis kallare, mot slutet av perioden cirka 8 °C kallare än idag. - Den relativa kustlinjen (se avsnitt 10.3.4) sjunker först men stiger då istäcket börjar växa. - Istäcket börjar växa till i fjällkedjan om cirka 5 000 år. - Permafrost kan förekomma framför det växande istäcket.
20-30	- Kallperiodens maximum nås. - Istäcket når nuvarande Östersjökusten och södra delarna av Dalarna. - Ned mot Östersjökusten i norr och på delar av Småländska höglandet finns permafrost. - Jordskorpan är nedtryckt, Mälardalen och stora delar av nuvarande Östersjökusten ligger under vatten.
30-40	- Varmperiod, klimatet blir snabbt varmare men är fortfarande något kallare än idag, med temperaturer någon grad lägre än dagens. - Permafrosten tinar. - Isen smälter, med undantag av vissa rester i fjällkedjan. - Den relativa kustlinjen sjunker, men fortfarande ligger stora områden längs Östersjökusten under havet.
40-60	- En ny kallperiod inleds, mot slutet av perioden är det ned mot 10 °C kallare än idag. - Istäcket växer till mot sydost. - Den relativa kustlinjen stiger, eventuellt öppnas en förbindelse mellan Mälardalen och Kattegatt. - Permafrost kan förekomma framför inlandsisen. Mot slutet av perioden är bara Västkusten och södra Östersjökusten fria från permafrost.
60-70	- Kallperioden når sitt maximum, isen täcker Finland och når området söder om nuvarande Vättern. - Landet trycks ned, av de isfria delarna är det endast idag höglänta partier som ligger över havsytan. - I icke is- eller havstäckta delar av landet råder permafrost.
70-80	- Varmperiod, det blir mildare men är fortfarande ned mot 5 °C kallare än idag. - Isen drar sig tillbaka relativt snabbt till en utbredning som är något mindre än under perioden 20 000-30 000 år. - Den relativa kustlinjen sjunker men stora delar av Mälardalen och nuvarande Östersjökusten ligger fortfarande under vatten. - Permafrosten tinar.
80-100	- Ny kallperiod, mot slutet av perioden ned mot 12 °C kallare än idag. - Isen växer till. - I takt med att isen växer stiger den relativa kustlinjen. - Permafrost förekommer framför den framryckande inlandsisen.
100-110	- Kallperiodens och cykelns glaciala maximum nås. - Isen täcker hela landet och sträcker sig in i Ryssland och ned mot norra Polen och Tyskland.
110-130	- Interglacial, det blir snabbt varmare. - Isen drar sig tillbaka till sin nuvarande omfattning. - Permafrosten tinar. - Kustlinjen är fortfarande något högre än idag. - Den varmaste perioden inträffar runt 120 000 år med temperaturer som dagens eller något högre.
130-150	- En ny glacial cykel inleds. - Istäcke och permafrost breder åter ut sig från fjällkedjan. - Mot slutet av perioden når istäcket ungefär lika långt som vid den maximala utbredningen i perioden 60 000-70 000 år.



Figur 10-6. Antagen isutbredning och kustlinje i samband med glacialens varma respektive kalla maxima.

10.3.4 Tempererat/borealt tillstånd

Tempererat/borealt klimatstyrts processstillstånd är karakteristiskt för interglacialer (varmperioder). För närvarande råder i princip tempererade förhållanden från Skåne till Dalälven. Norr om Dalälven råder boreala – kalltempererade – förhållanden. Under interstadialer (milda perioder under en glacial) råder tempererade/boreala förhållanden i landets södra delar och – om klimatet är tillräckligt varmt – även i de östra delarna. Områden med boreala förhållanden kan även förekomma under mindre kärva stadialer (kalla perioder under en glacial).

Tempererat klimat är fuktigt, dvs nederbörden är större än avdunstningen. Temperaturen den varmaste månaden är högre än 10 °C. I varmttempererade områden är temperaturen den kallaste månaden högre än –3 °C, medan den i kalltempererade – boreala – områden är under –3 °C /Liljequist, 1975/. Det fuktiga klimatet medför höga grundvattennivåer och grundvattenytan följer topografin.

Fuktigt klimat ger goda förhållanden för vegetation och fauna. Växter etableras snabbt och förhindrar erosion. Den naturliga vegetationen domineras av skogar med barrträd i kalltempererade områden och lövträd i varmttempererade. Våtmarker är vanligt förekommande, idag består 21 procent av Sveriges yta av våtmarker. Den rika vegetationen och den goda tillgången på vatten ger ett rikt men årstidsberoende djurliv med insekter, gnagare, fåglar och större däggdjur. Det ger också goda förutsättningar för jordbruk, speciellt i områden där jordlagren avsatts under hav/sjöar. Även inom jordbruket begränsas tillväxten av de kalla årstiderna. I kustområden påverkas biosfären av kustlinjeförskjutning samt av salthalten i omgivande hav/sjö.

Även under tempererade/boreala förhållanden är landet påverkat av tidigare nedisningar. Islasten trycker ned jordskorpan, under isfria perioder strävar den att återta sin ursprungliga form. Processen är långsam i relation till istillväxt och avsmältning, vilket medför att jordskorpan är i ständig rörelse. Detta är framför allt märkbart i kustområden där kustlinjen förskjuts då landet höjs/trycks ned. Kustlinjeförskjutningen påverkas också av förändringar av havsytans nivå. Vid en övergång till kallare klimat sjunker havsytan på grund av att vatten binds i inlandsisar. Det motsatta uppträder då klimatet blir varmare. Havsytans nivå påverkas också av att vattnets densitet är temperaturberoende /Boulton m fl, 1999a/.

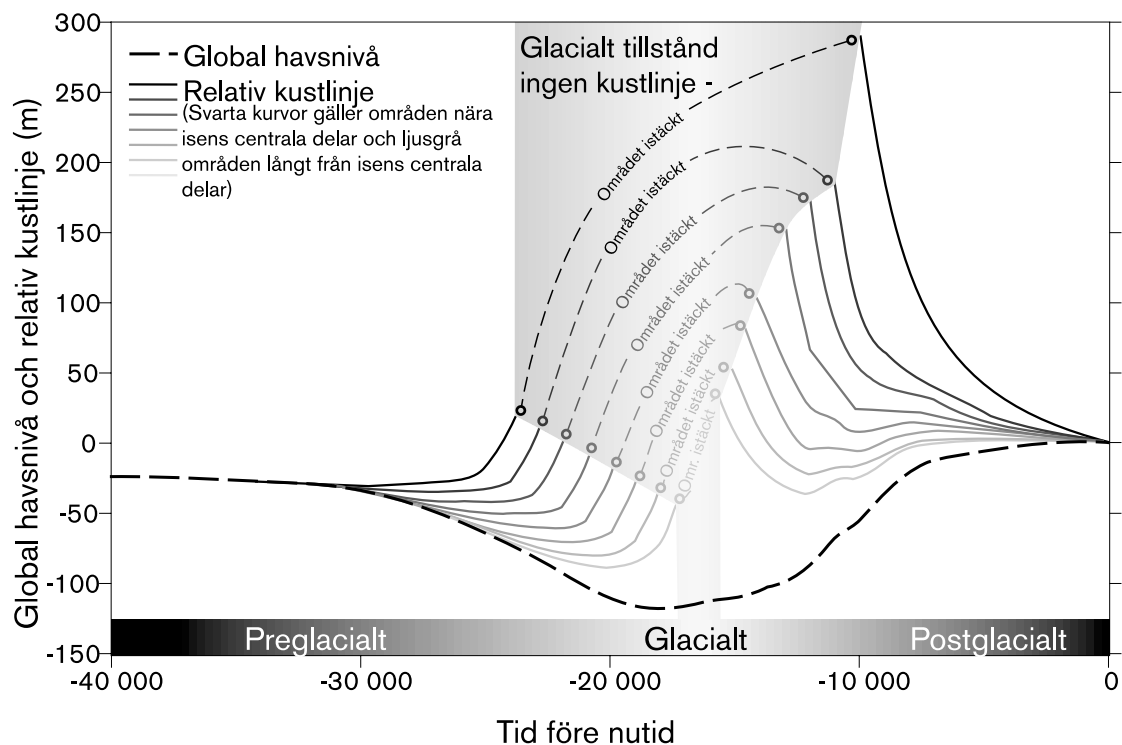
Klimatrelaterade faktorer som kan påverka förhållandena vid ett förvar är:

- Temperatur och nederbörd.
- Riktning och hastighet på landhöjning/kustlinjeförskjutning.
- Salthalt i Östersjön.

Den långsiktiga förändringen av temperaturen inom det tempererade/boreala tillståndet täcks in av de variationer vi idag kan se mellan landets olika delar /Frenzel m fl, 1992; Raab och Vedin, 1995/. Då isen drar sig tillbaka eller avancerar över ett område kommer både landhöjning/nedtryckning och höjning/sänkning av havsytan att ske betydligt snabbare än idag, och orsaka en snabb kustlinjeförskjutning. För att belysa detta delas det tempererade/boreala tillståndet in i en preglacial, en interglacial och en postglacial regim.

Förhållandena under den interglaciala regimen beskrivs i bas- och kapseldefektscenariot. Kustlinjeförskjutningen under den preglaciala regimen skiljer sig från den interglaciala och klimatet är kallare än idag. Den postglaciala regimen karakteriseras av en snabb sänkning av kustlinjen medan klimatet kan vara som idag eller kallare/varmare än idag. Kustlinjeförskjutningen påverkar Östersjöns förbindelser med västerhavet och därmed dess salthalt. Så länge Östersjön är ett innanhav påverkas dock salthalten mer av variationer i nederbörden än av djupet på Öresund och Bälten /Westman m fl, 1999/.

Då en inlandsis växer trycker den ned jordskorpan, samtidigt sänks havsytan. I Sverige är isens nedtryckning av jordskorpan generellt större än sänkningen av havsytan. Havsytan relativt en fix punkt på jordskorpan – den relativa kustlinjen – stiger således under en glaciation då jordskorpan trycks ned. Långt från isens centrala delar är nedtryckningen mindre och sänkningen av havsytan – den eustatiska komponenten av kustlinjeförskjutningen – har större betydelse. Nära isens centrala delar dominerar nedtryckningen – den isostatiska komponenten /Boulton, 1990 i Boulton m fl, 1999a/. En generaliserad bild av förloppet vid det förra glaciala maximumet ges i figur 10-7.

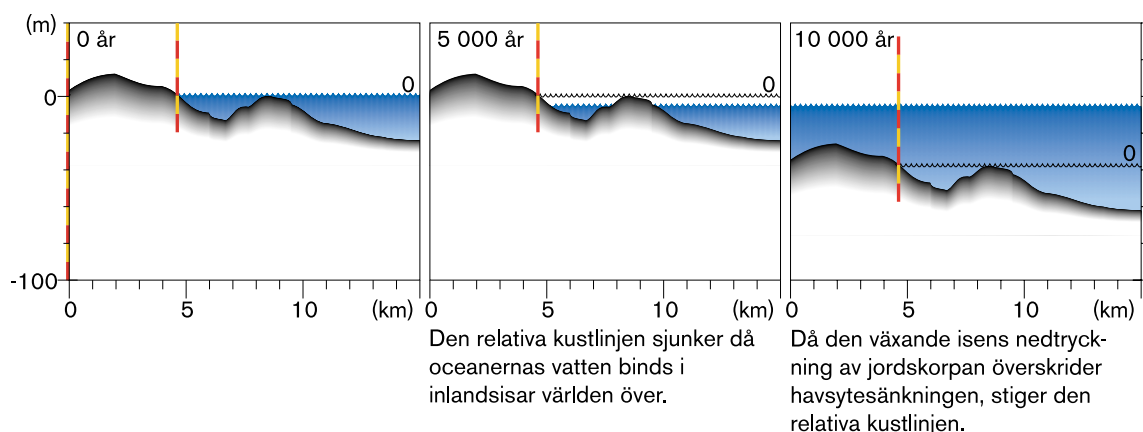


Figur 10-7. Generaliserad bild av förändringen av den relativa kustlinjen i närheten av det skandinaviska istäcket innan och efter det förra glaciala maximumet. Det grå området, där kurvorna binds ihop av streckade linjer, representerar perioden då området är täckt av is /*Boulton m fl, 1999a*/.

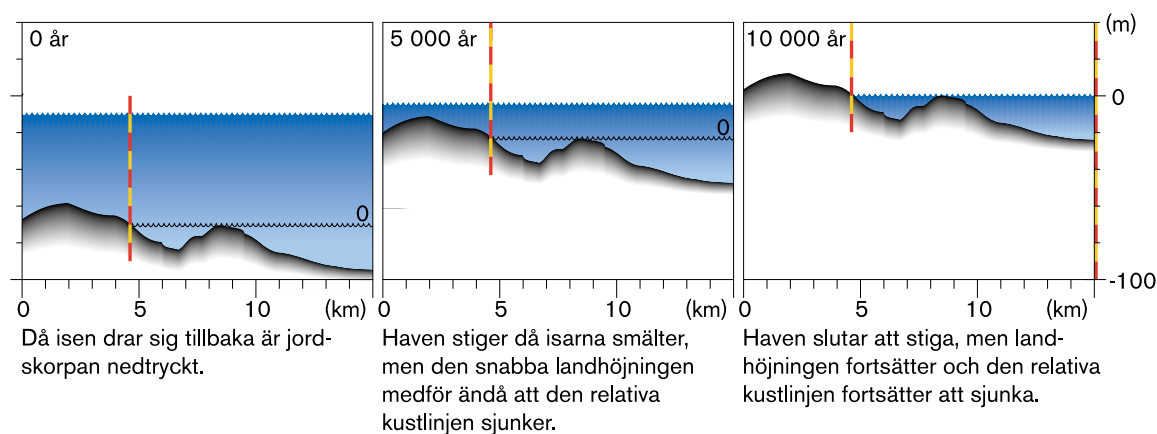
Utvecklingen under den preglaciala regimen beskrivs i den vänstra delen av figur 10-7, samt i figur 10-8. Inledningsvis sker en regression, dvs sänkning av den relativa kustlinjen. Det beror på att havsytan sjunker då inlandsisar växer världen över och på grund av att vattnets densitet ökar då temperaturen sjunker. Allt eftersom det skandinaviska istäcket växer trycks jordskorpan ned och regressionen övergår till transgression, dvs den relativa kustlinjen stiger. Transgressionen är störst i områden nära isens centrala delar och avtar med avståndet från isen. Under perioder med regression kan erosionen bli omfattande eftersom klimatet är kallt och det kan ta tid för växtligheten att etablera sig /*Boulton m fl, 1999a*/.

Utvecklingen under den postglaciala regimen beskrivs schematiskt i den högra delen av figur 10-7, samt i figur 10-9. I det inledande skedet av den postglaciala regimen är den relativa kustlinjen som högst – jordskorpan är fortfarande nedtryckt och havsytan stiger. Jordskorpan höjs snabbt, snabbare än havsytan stiger och den relativa kustlinjen sjunker. Då isarna smält avstannar höjningen av havsytan medan jordskorpan alltjämt höjs, dock med en avtagande hastighet.

De schematiska bilder som givits ovan kompliceras av att Östersjön är ett innanhav. Periodvis kan förbindelserna med världshaven brytas då sund stängs på grund av regression. Under andra perioder kan transgression leda till att sund/landområden omvandlas till helt fria förbindelser med världshaven. Även istäcket kan medverka till att förbindelserna med världshaven bryts, och så kallade isdämda sjöar bildas.



Figur 10-8. Utvecklingen under den preglaciala regimen.



Figur 10-9. Utvecklingen under den postglaciala regimen.

10.3.5 Permafrosttillstånd

Permafrosttillståndet omfattar områden med permafrost där grundvattenflödet inte är påverkat av närvaron av en inlandsis. Under interglacialer förekommer permafrost i fjällkedjan. Under interstadialer kan permafrosttillstånd råda i landets norra delar. Under kallare perioder och då istäcket växer till kan permafrosttillstånd även råda i landets mellersta och södra delar.

Permafrost definieras på basis av temperatur. Permafrost är områden där marktemperaturen är under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ under minst två på varandra följande år, dvs vid inledningen av år två:s kallperiod finns partier med temperatur under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kvar sedan föregående kallperiod. En temperatur på $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ betyder inte nödvändigtvis att marken är frusen eftersom fryspunkten för vatten i jord och berg kan vara lägre. Vid permafrostens yta finns ett decimeter till någon meter tjockt lager som fryser och tinar årligen. Det kallas det aktiva lagret. Om fryspunkten ligger under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ omfattar det aktiva lagret den översta delen av permafrosten /French, 1996/.

Idag förekommer permafrost på höga höjder och latituder. Eftersom det kan ta tusentals år för permafrost att tina kan rester från tidigare kallperioder finnas kvar under perioder med varmare klimat. Sådan sk relik permafrost förekommer i Ryssland och Kanada idag.

Klimatet under permafrosttillståndet är kallt och relativt torrt. Nederbörden kan vara 50 procent av dagens /Boulton m fl, 1999a/. Årstidsvariationen är betydande. Den största delen av året är månadsmedeltemperaturen under eller mycket under 0 °C. Bara under två–tre månader per år stiger temperaturen över fryspunkten /French, 1996/.

Permafrosttillståndet har två regimer som sammanfaller med den klassificering som vanligen görs av permafrost, en kontinuerlig och en diskontinuerlig. I områden med kontinuerlig permafrost är marken frusen överallt, utom under större sjöar och vattendrag. I diskontinuerliga områden är partier med frusen mark separerade av ofrusna delar. I övergången mot boreala förhållanden blir förekomsten av permafrost allt mer sporadisk /French, 1996/.

I områden med kontinuerlig permafrost är tundraecosystemet karakteristiskt /French, 1996/. Växtligheten har anpassat sig till den mycket korta växtsäsongen och består av örter, snår och buskar. På torra platser finns lavar och på våta mossor. På grund av den ringa växtproduktionen bildas små mängder torv trots stora områden med våtmarker. Under sommaren förekommer mycket fågel som livnär sig på mygg. Ren och lämlar är exempel på däggdjur som förekommer vid kontinuerlig permafrost. Fåglarna flyttar söderut under vintern, renen söker sig mot skogarna, medan lämlar kan övervintra under det isolerande snötäcket /Boulton m fl, 1999a/.

Där permafrosten övergår till att bli diskontinuerlig liknar vegetation och djurliv allt mer det kalltempererade (boreala). Barrträd kan förekomma, sk taiga. Trädgränsen kan sammanfalla med gränsen mellan kontinuerlig och diskontinuerlig permafrost; så är det t ex i stora delar av Nordamerika idag.

Det finns ett samband mellan årsmedeltemperaturen i luft och temperaturen i marken. Marktemperaturen ökar med djupet på grund av värmeförsel från jordens inre. Vid ytan sker ett värmeutbyte med atmosfären. Utvecklingen av permafrost avspeglar en negativ värmebalans vid ytan. På ett visst djup varierar inte marktemperaturen under året. I tempererade områden är temperaturen på detta djup ungefär lika med årsmedeltemperaturen i atmosfären. I områden med permafrost är energiutbytet vid ytan mer komplext och temperaturen på motsvarande djup är vanligen flera grader högre än årsmedeltemperaturen i luften. Det komplexa värmeutbytet har bl a att göra med frysning/tining och att markens värmeledningsförmåga påverkas av dess vatteninnehåll och av om marken är frusen eller ej. En annan viktig egenskap är markytans albedo, dvs andelen inkommande solstrålning som reflekteras av ytan. Exempel på faktorer som påverkar värmeutbytet är /French, 1996/;

- Nederbörd – både form (snö, regn) och vilken tid på året nederbörden faller har betydelse, påverkar både vatteninnehåll och albedo.
- Vind – förflyttar snö och jord samt påverkar avdunstning.
- Vegetation – påverkar albedo, mängden snö som når marken, vindens möjlighet att förflytta snö och jord samt avdunstning.

- Topografi – förekomst av höjder och sänkor samt deras orientering i väderstrecken.
- Egenskaper hos jord och berg – vatteninnehåll, albedo, värmeledningsförmåga och värmekapacitet.
- Hav, sjöar och vattendrag – avstånd till – och förekomst av – större vattensamlingar.

I områden med kontinuerlig permafrost, där det är mycket kallt, har de termiska egenskaperna hos jord och bergmassan som helhet störst betydelse för utvecklingen av permafrost. Där klimatet är något varmare och permafrosten är diskontinuerlig har faktorer som topografi, vegetation och förekomst av snö större betydelse för utvecklingen av permafrost. Från Kanada finns exempel på områden där snötäcket hindrar utveckling av permafrost trots årsmedeltemperaturer runt $-4,5\text{ °C}$. Det finns också exempel på områden där sporadisk permafrost förekommer i anslutning till torvrika områden trots att årsmedeltemperaturen är högre än 0 °C /French, 1996/.

I nuvarande Kanada och Alaska sammanfaller gränsen för förekomst av permafrost i stora drag med -1 °C isotermin för årsmedeltemperatur i atmosfären. I områden med årsmedeltemperatur mellan -1 och -4 °C begränsar sig permafrosten till utsatta delar, t ex norrsluttningar. Där årsmedeltemperaturen är under -4 °C är permafrosten mer allmänt förekommande. Gränsen mot kontinuerlig permafrost går där årsmedeltemperaturen är mellan -6 och -8 °C . Temperaturen just under det djup där inga årliga variationer förekommer är här -5 °C . Motsvarande marktemperatur har uppmätts i gränsen mellan kontinuerlig och diskontinuerlig permafrost i Ryssland /French, 1996/.

Utvecklingen av permafrost är ett komplext förlopp där faktorerna ovan spelar in. Även den paleoklimatologiska utvecklingen har betydelse, t ex om platsen varit täckt av is. Även om förhållandena i nuvarande Kanada och Alaska som helhet skiljer sig från de skandinaviska, finns det områden där förhållandena kan antas likna dem vi kan förvänta oss i ett kallt Skandinavien. För att beskriva utvecklingen i Sverige krävs dock mer ingående studier av klimatförhållanden och andra faktorer som påverkar utvecklingen av permafrost. Några sådana studier är inte genomförda idag.

Permafrosten och det årligen frusna aktiva lagret begränsar infiltration och grundvattenbildning. Den allra största delen av årsnederbörden bidrar till ytavrinning, och flödena i vattendragen varierar mycket kraftigt över året. Under vintern omfattar den ringa tillrinningen till vattendragen endast grundvatten från ofrusna partier. Under några få veckor på våren smälter snö och is, avrinning och flöden når sina maximum. Det aktiva lagret tinar. Den låga temperaturen gör att avdunstningen är liten. Smältvatten kan inte infiltrera den frusna marken, och trots den ringa nederbörden är stora områden vattensjuka under den korta sommaren /Boulton m fl, 1999a; French, 1996/.

I områden med begränsad växtlighet är markytan utsatt för vindpåverkan. Högre höjder blåses snöfria. Jord transporteras bort och bildar dyner. Vindpåverkan tillsammans med den upprepade frysningen och tiningen samt vårfloden bidrar till en omfattande erosion vid ytan /Boulton m fl, 1999a; French, 1996/.

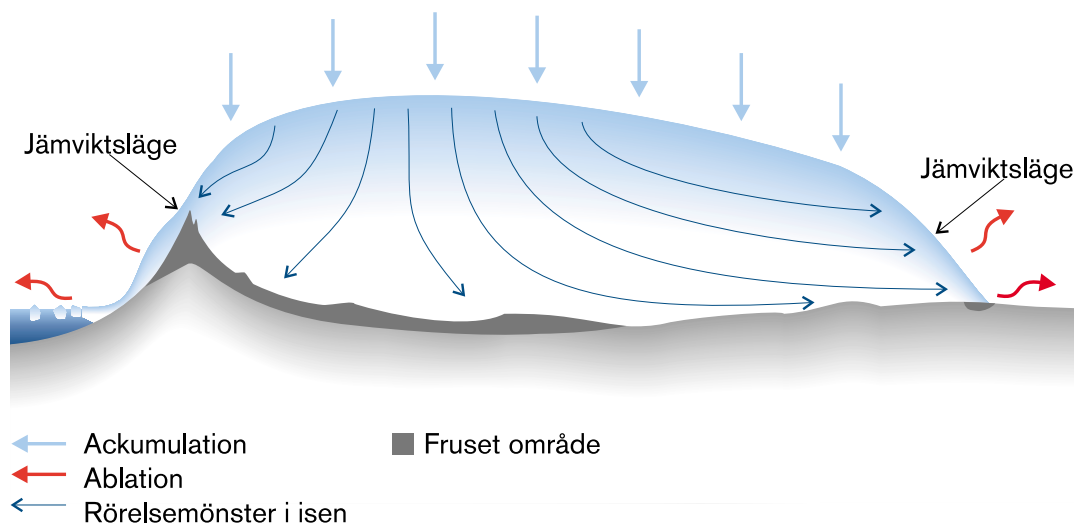
10.3.6 Glacialt tillstånd

Det glaciala tillståndet är karakteristiskt för stadialer (kallperioder). Då klimatet blir kallare börjar isen växa till i fjällkedjan längs den norsksvenska gränsen och expanderar mot öster och söder. Under de strängaste stadialerna täcker isen hela Skandinavien och når in över Ryssland i öst och ända ner till norra Tyskland och Polen i söder. Så omfattande isutbredning har förekommit i storleksordningen vart hundratusende år. Under interstadialer (varmare skeden av en glacial) begränsar sig det glaciala tillståndet till fjällkedjan. Under mindre kärva stadialer kan området längs norska gränsen och ned mot de centrala delarna av Sverige i söder och nuvarande Bottenhavskusten i norr vara istäckta.

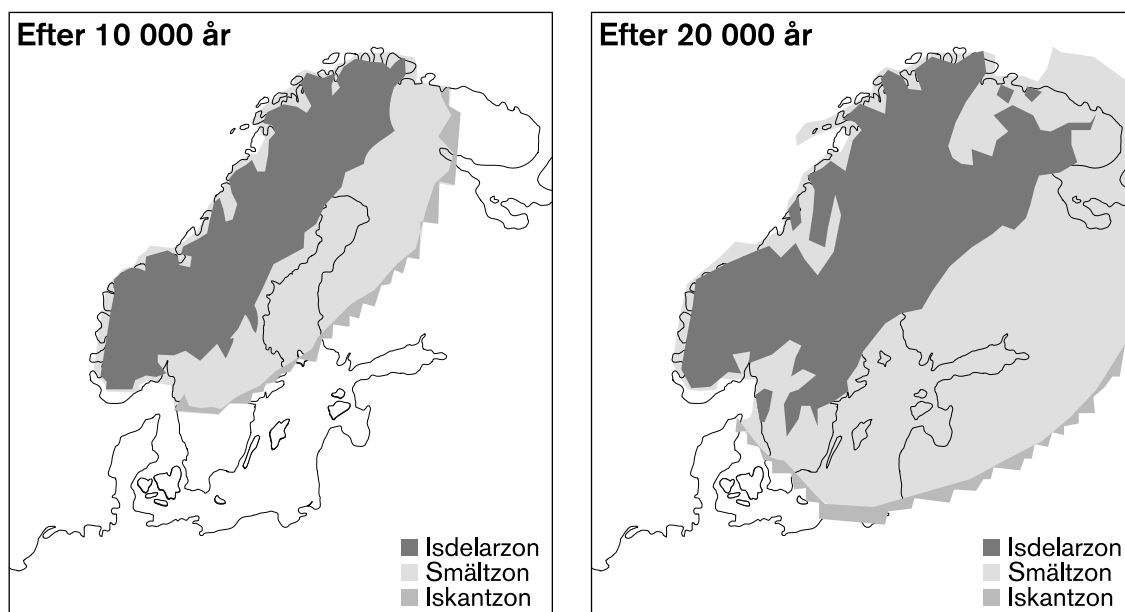
Klimatet är kallt. För att isarna ska växa till får inte nederbörden vara alltför liten. Simuleringar av det skandinaviska istäcket visar att ett mer maritimt klimat gynnar istillväxt /Boulton och Payne, 1992; Boulton m fl, 1995/.

På ytan av isen finns alger och mikrober. Bergstoppar, s k nunatakker, kan sticka upp ur istäcket. Här kan lavar och möjligen örter förekomma. Vid iskanten kan fåglar och däggdjur leva. Där isen slutar i havet kan ett produktivt marint ekosystem som kan upprätthålla en fiskpopulation finnas. Här finns också sjöfågel och däggdjur som isbjörn, säl och val.

Under istäckets centrala delar – den s k isdelarzon – är marken frusen. Närmare istäckets kant nås trycksmältpunkten och en bred zon där smältning förekommer i gränsskiktet mellan mark och is uppstår, den s k smältzonen. I området allra närmast iskanten kan marken åter vara frusen. Det frusna området kan, speciellt då isen växer till, sträcka sig flera kilometer framför iskanten. På istäckets övre delar, inom det s k ackumulationsområdet, tillförs snö och is. På de nedre delarna och vid iskanten förs is bort genom avsmältning och kalvning, s k ablation. På en viss höjd – jämviktssläget – råder jämvikt mellan ackumulation och ablation. Under perioder av istillväxt förskjuts jämviktssläget nedåt, det motsatta sker vid avsmältning. Glaciärisen är plastisk och flyter genom sin egentyngd från högre till lägre nivåer /Boulton och Payne, 1992/. En schematisk skiss av istäcket visas i figur 10-10.



Figur 10-10. Schematisk skiss av en inlandsis.

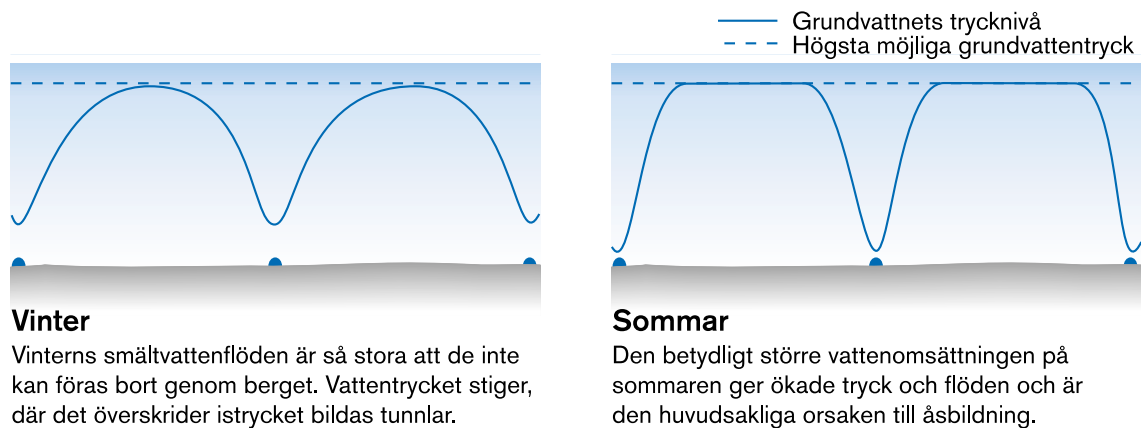


Figur 10-11. Istäckets och isdelarzonens utbredning efter 10 000 respektive 20 000 års istillväxt /ur Boulton m fl, 1996/.

Simuleringar av det skandinaviska istäcket visar att allteftersom istäcket växer till från fjällkedjan förskjuts isdelarzonen mot öster. Den når dock inte längre än till de centrala delarna av Sverige i söder och nuvarande Bottenhavskusten i norr /Lundquist, 1986 i Boulton m fl, 1999a/. Zonens utbredning efter 10 000 respektive 20 000 års istillväxt visas i figur 10-11.

I smältzonen smälter isen i gränsskiktet mellan berggrunden och isen. Skillnaderna mellan årstiderna är stora. Under vintern begränsar sig smältvattenflödet till vattnet som smälter från isens botten, under sommaren tillförs stora mängder smältvatten och även regnvatten från isens yta.

I en analys av grundvattenflödet under glaciärer bedömer Boulton m fl /1999b/ att smältvattnet huvudsakligen transporteras mot iskanten genom istunnlar i gränsskiktet mellan is och berggrund. Smältvattnet transporteras in till istunnlarna genom berggrunden. Vattenflödet i gränsskiktet mellan is och mark kan vara betydande och berggrundens transmissivitet är begränsad, det medför att vattentrycket stiger. Om vattentrycket överskrider istrycket bildas en tunnel i gränsskiktet mellan isen och dess underlag. Avståndet mellan tunnlar beror dels på underlagets (berggrundens) transmissivitet, dels på inflödet av smältvatten till systemet. Minimiavståndet mellan tunnlar är det avstånd som medför att vattentrycket överallt ligger under istrycket. Systemet av tunnlar under isen bestäms av vinterflödena. De uppkommer helt och hållet på grund av smältning i gränsskiktet mellan isen och dess underlag. Vid kanten till isdelarzonen är dessa flöden små. De ökar sedan i riktning mot iskanten, för att åter minska då man närmar sig iskanten. De maximala vinterflödena har uppskattats till 50 mm/år /Boulton och Payne, 1992/. De betydligt större flödena under sommaren ger maxflödena i tunnlar och är den huvudsakliga orsaken till åsbildning. Under sommaren då smältvattenflöden och vattentryck ökar bildas också temporära kanaler, t ex i anslutning till sprickor i glaciären. Under vintern stängs dessa kanaler av isflödet. Det är inte troligt att de uppstår på samma ställe nästa sommar. En schematisk skiss av tunnlar och grundvattentryck visas i figur 10-12.



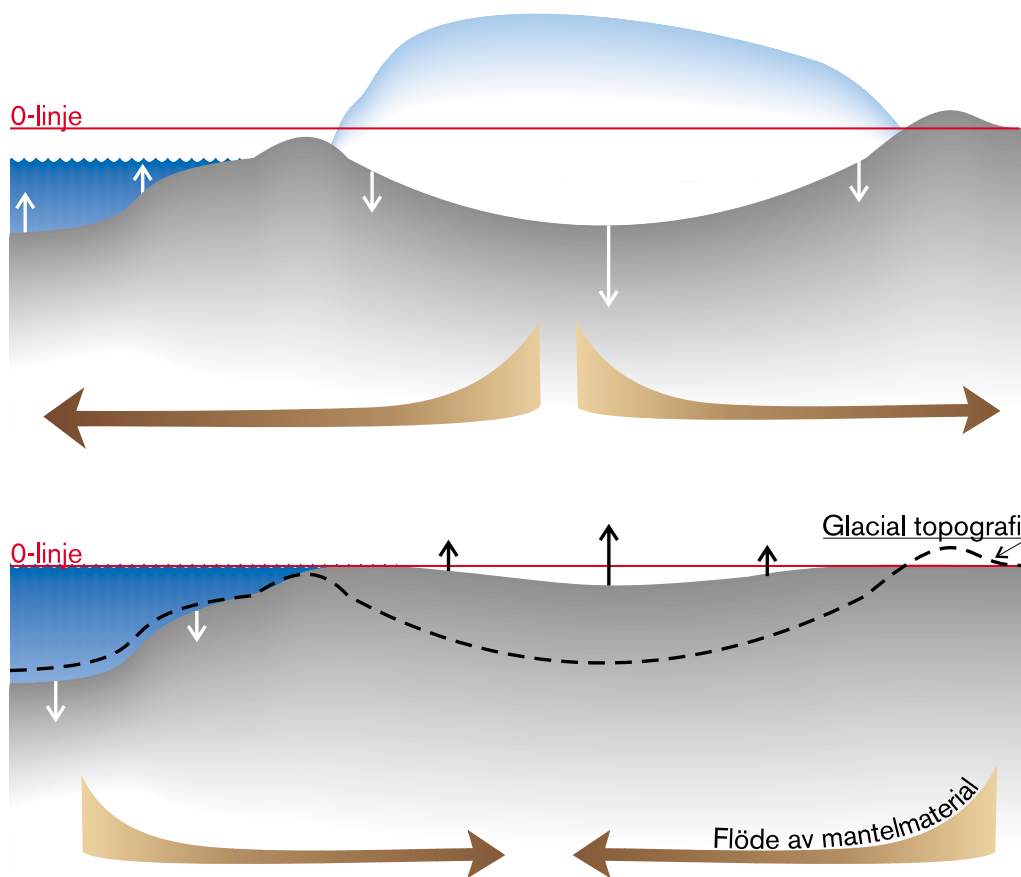
Figur 10-12. Tvärsnitt genom inlandsisen som visar grundvattentryck och istunnlar i smältzonen. Avståndet mellan tunnlar beror av smältvattenflödet och underlagets (berggrundens) transmissivitet.

Den kemiska sammansättningen hos vattnet som infiltrerar berggrunden under en inlandsis skiljer sig från vattnet som infiltreras under isfria förhållanden. Det glaciala smältvattnet är, liksom nederbördsvattnet, syrerikt. Under ett istäcke förväntas dock endast mycket små mängder organiskt material finnas. Den konsumtion av syre som under isfria förhållanden sker då nederbördsvattnet passerar de översta jordlagren utblir därmed.

Inlandsisen utgör en last på jordskorpan. Jorden indelas i kärnan, manteln och skorpan. Inom plattetektoniken talar man också om litosfären. Litosfären består av skorpan och de yttre delarna av manteln. Man tänker sig litosfären som ett elastiskt/sprött material som vilar på ett visköst medium.

Då klimatet blir kallare och inlandsisar växer till förflyttas vatten från oceanerna till kontinenterna. Det tryck litosfären under oceanbottarna utsätter det underliggande viskösa mediet för minskar. Samtidigt läggs en islast på delar av den kontinentala litosfären som därmed trycks ned. Det viskösa materialet rör sig in under oceanbottarna och ut från området under inlandsisarna. Oceanbottarna stiger och landet under inlandsisarna sjunker. När isarna smälter fylls oceanerna åter med vatten och islasten försvinner. Det viskösa materialet rör sig ut från området under oceanbottarna och in under områdena som varit täckta av inlandsis. Oceanbottarna sjunker och litosfären under de forna inlandsisarna stiger /Morén och Pässe, 1999/. Förloppet visas i figur 10-13.

Förloppet som beskrivs ovan kommer att påverka spänningstillståndet i berggrunden. Nedtryckningen/höjningen av litosfären kompliceras av att skorpan tjocklek varierar. Dessutom utsätts berggrunden kontinuerligt för påkänningar av plattetektoniska rörelser. Det mekaniska tillstånd som detta ger i den Baltiska skölden diskuteras i avsnitt 11.3.2 i kapitel 11, Tektonik – jordskalvsscenario.



Figur 10-13. Schematisk skiss över litosfärens rörelser och det viskösa flödet under litosfären vid glaciala och interglaciala förhållanden /ur Morén och Pässe, 1999/.

De klimatrelaterade faktorer som påverkar förvaret under det glaciala tillståndet är:

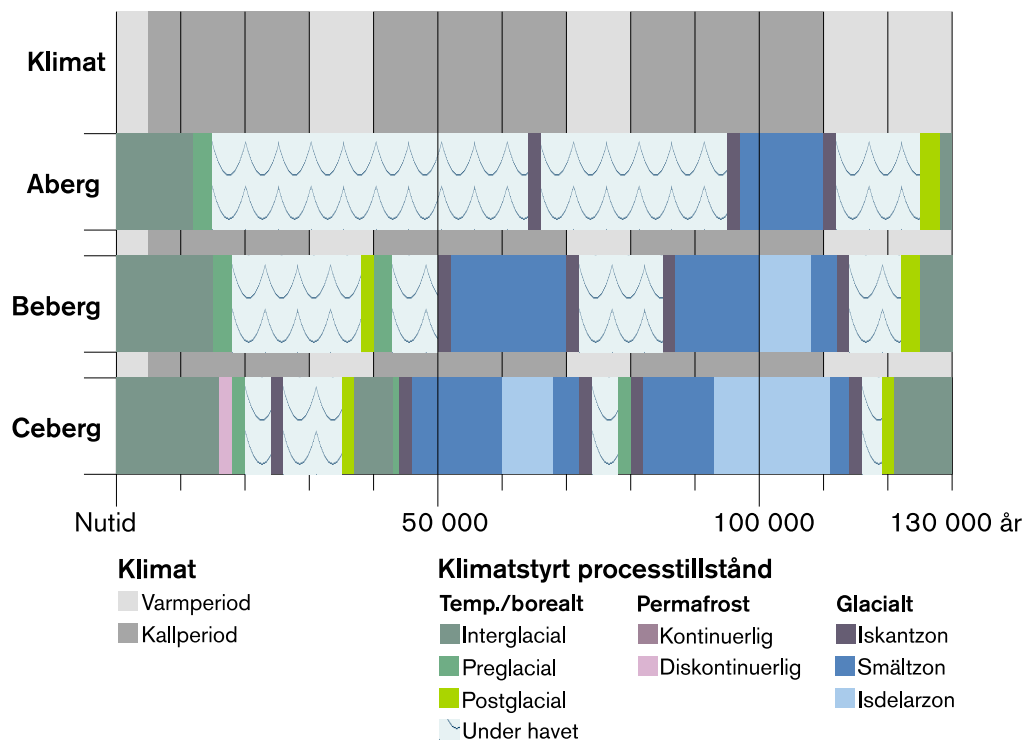
- temperatur,
- permafrost,
- islast,
- vattentryck,
- gradienter för grundvattenflöde,
- smältvattenflöden,
- smältvattnets kemiska sammansättning.

Baserat på variationen av dessa egenskaper har tre regimer identifierats, de är /Boulton m fl, 1999a/:

- isdelarregimen,
- smältzonsregimen,
- iskantregimen.

10.3.7 Utvecklingen vid de tre försvarsplatserna

Utvecklingen vid de tre försvarsplatserna beskrivs som tidsserier av klimatstyrda processtillstånd³ och perioder då områdena ligger under havets yta. De plats specifika beskrivningarna grundar sig på en tänkt utbredning av de klimatstyrda processtillstånden i tid och rum. Denna i sin tur är baserad på beskrivningen av klimatförhållandena från tabell 1-1, Påsses modellering av kustlinjeförskjutningen /Morén och Pässe, 1999/, samt modelleringar och rekonstruktioner av inlandsisens dynamik och utbredning /Boulton och Payne 1992; Mangerud, 1991; Fredén, 1994/. För att göra en bedömning av förekomst och utbredning av permafrost har dessutom beskrivningar av nuvarande förhållanden i Nordamerika använts /French, 1996/. Utvecklingen på de tre platserna visas i figur 10-14.



Figur 10-14. Utvecklingen vid Aberg, Beberg och Ceberg som tidsserier av klimattillstånd, samt tiden då platserna ligger under havets yta.

³ Pre- respektive postglaciala förhållanden sägs råda i samband med att platserna sjunker/stiger under/över havet. Det är något oegentligt eftersom de karakteristiska förändringarna av kustlinjen (se avsnitt 10.3.4) sker då platserna ligger långt från kusten, t ex ligger alla platserna långt under havets yta i det postglaciala skedet. Pre- respektive postglaciala förhållanden sägs ändå råda med motiveringen att förändringar som sker i samband med att en plats förvandlas från hav till land, och vice versa, är betydelsefulla för biosfären och även påverkar randvillkoren för grundvattenflöden.

Aberg

Från idag och cirka 20 000–30 000 år framåt blir klimatet successivt kallare. När det är som kallast kan årsmedeltemperaturen vid Aberg vara cirka $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mot dagens $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inledningsvis sjunker den relativa kustlinjen. Delar av området förväntas dock hela tiden ligga under havets yta. Klimatet är under denna period tempererat/borealt. Då isen börjat växa till i fjällkedjan vänds regressionen i transgression och om cirka 15 000 år ligger hela Abergområdet under vatten.

Området fortsätter att ligga under havet ända fram till nästa interglacial. Havsnivån varierar då istäcket drar sig tillbaka och växer till, men det har ingen större betydelse för förhållandena vid Aberg som hela tiden ligger under havsytan. Endast under de perioder då inlandsisen når Aberg förändras förhållandena.

Inlandsisen når Aberg under två skeden av den glaciala/interglaciala cykeln. Då isen når sin maximala utbredning under stadialen, som antas inträffa om 60 000–70 000 år kan iskanten nå Aberg. Perioden 64 000–66 000 år antas området ligga i iskantzonen. Under glacialens strängaste kallperiod, efter cirka 95 000 år, når det nu framryckande istäcket åter Aberg. Perioden 95 000–97 000 år antas området ligga i iskantzonen, och därefter, ungefär mellan 97 000 och 110 000 år in i framtiden i den glaciala smältzonen. Om cirka 110 000–112 000 år antas det nu avsmältande istäcket passera Aberg.

Om drygt 125 000 år antas de högsta delarna av Abergområdet stiga upp ur havet. Kustlinjen försätter dock att ligga cirka 5–10 meter över dagens under hela interglacialen.

Sammanfattningsvis kan sägas att Aberg är en plats som med undantag av kortare perioder under interglacialer ligger under havets yta. Aberg är endast istäckt under de kallaste perioderna av en glacial cykel. Under mindre stränga stadialer kan isfronten ligga vid Aberg.

Beberg

Beberg ligger längre från kusten än Aberg och kommer inte nämnvärt att påverkas av den regression som sker vid övergången till ett kallare klimat. Sjöarna i området växer igen under denna period. Allteftersom isen växer övergår regressionen i transgression och havet närmar sig Beberg. Om cirka 15 000 år börjar havet inta de lägst belägna områdena och efter cirka 18 000 år ligger hela området under havet. Årsmedeltemperaturen kan i detta skede vara -2 till $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, mot dagens $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Innan Beberg blir vattentäckt kan sporadisk permafrost tänkas förekomma på utsatta platser. Med tanke på att Beberg i detta skede ligger nära kusten kommer permafrosten, om den alls förekommer, att vara mycket begränsad. Klimatförhållandena kan betraktas som boreala.

Under varmperioden mellan 30 000–40 000 år fortsätter Beberg att ligga under havets yta ända till slutskedet. Om cirka 38 000 år antas de högsta partierna sticka upp som öar i kustlandskapet. Efter det antas landhöjningen fortgå ytterligare cirka 2 000 år innan kustlinjen åter börjar stiga på grund av ny istillväxt, och om cirka 43 000 år antas Beberg åter ligga helt under havet.

Den framryckande isen kan nå Beberg om cirka 50 000 år då platsen ligger under havets yta. Perioden 50 000–52 000 år antas Beberg ligga i iskantzonen. Området ligger sedan i smältzonen tills isen åter passerar då den drar sig tillbaka. Perioden 70 000–72 000 år antas Beberg åter ligga i iskantzonen. Möjligtvis kan platsen ligga vid kanten av isdelar-zonen då isen når stadialens maximum om cirka 64 000–66 000 år.

Under den därpå följande korta och relativt kalla interstadialen förblir Beberg vattentäckt.

Om 80 000 år blir det åter kallare och om cirka 85 000–87 000 år antas det växande istäcket åter passera Beberg som då ligger i iskantzonen. Sedan följer en lång period då platsen ligger i smältzonen avbruten av en kortare period i isdelarzonen om 100 000–108 000 år. Perioden 112 000–114 000 år antas isen åter passera och Beberg ligger i iskantzonen. Iskanten ligger i havet och Beberg är vattentäckt.

Om cirka 122 000 år antas de högsta partierna i området åter stiga upp ur havet. Beberg fortsätter att stiga ur havet till interglacialens slutskede om cirka 130 000 år. Perioden 128 000–132 000 år ligger hela området över kustlinjen. Havsnivån är då fortfarande något högre än dagens.

Liksom Aberg kommer Beberg att ligga under havets yta en stor del av en glacial cykel. Läget en bit in från den nuvarande kusten medför att Beberg stiger upp ur havet under mildare interstadialer. Det nordligare läget medför att perioderna då platsen är istäckt är fler och mer långvariga.

Ceberg

Ceberg är den nordligaste av de tre platserna. Området ligger en bit från kusten och påverkas inte av kustlinjeförskjutningen förrän om cirka 18 000 år då den stigande kustlinjen når de lägst belägna partierna. Under den inledande perioden är förhållandena boreala. Igenväxning av sjöar bedöms vara den mest betydelsefulla förändringen. Om cirka 10 000 år kan det ha blivit så kallt att sporadisk permafrost kan tänkas förekomma på utsatta platser. I takt med att klimatet blir kallare närmar sig den stigande kustlinjen Ceberg. Läget nära kusten gör det inte troligt att permafrost kommer att utvecklas i någon större omfattning. Här antas ändå en period med diskontinuerlig permafrost mellan 16 000 och 18 000 år. Mellan 18 000 och 20 000 år antas preglaciala förhållanden råda. Om 20 000 år antas hela området ligga under havets yta. Permafrosten antas hinna tina under den period området ligger under havet.

Om cirka 24 000 år antas isfronten nå Ceberg, och perioden 24 000–26 000 år ligger Ceberg i iskantzonen. Iskanten ligger i havet.

Vid inledningen av den följande varmperioden ligger Ceberg under vatten. Om cirka 35 000 år antas de högsta partierna stiga upp ur havet, och perioden 39 000–43 000 år ligger hela området ovanför havet. Därefter stiger den relativa kustlinjen åter. En ny kallperiod har inletts och årsmedeltemperaturen sjunker, dock inte tillräckligt mycket för att permafrost ska utvecklas annat än mycket sporadiskt.

Om cirka 44 000 år når isfronten Ceberg. I detta skede ligger området vid kusten och höjdparter bildar öar i en skärgård. Under perioden 44 000–46 000 år antas Ceberg ligga i iskantzonen. Sedan följer en period med smältzonstillstånd. Om cirka 60 000 år når isdelarzonen Ceberg. Efter en period i isdelarzonen följer en period då platsen ligger i smältzonen, perioden antas vara mellan 68 000 och 72 000 år. Perioden 72 000–74 000 år antas Ceberg åter ligga i iskantzonen. Iskanten ligger i havet.

Isfronten antas ligga nära Ceberg under hela den följande förhållandevis kalla varmperioden. Vid övergången mot nästa kallperiod ligger ändå stora delar av området över kustlinjen. Allteftersom isen växer till trycks jordskorpan ned, den relativa kustlinjen stiger, och allt större områden täcks av havet. På grund av det kustnära läget förväntas

inte permafrost utvecklas trots det kalla klimatet. Sporadisk permafrost kan förekomma men inte i sådan omfattning att permafrosttillstånd kan sägas råda. Perioden 78 000–80 000 år antas preglaciala förhållanden.

Isfronten kan nå Ceberg redan i inledningen av den följande kallperioden. Perioden 80 000–82 000 år antas Ceberg ligga i iskantzonen. Därefter följer en period då området ligger i smältzonen. Under perioden 93 000–111 000 år antas Ceberg ligga i isdelarzonen. Sedan passerar smältzonen innan iskantzonen når platsen om cirka 114 000 år. Isen antas lämna Ceberg om 116 000 år. Ungefär 3 000 år senare antas de högst belägna partierna stiga upp ur havet. Vid cirka 122 000 år antas hela området ligga över kustlinjen, där det förblir under resten av interglacialen.

Jämfört med Aberg och Beberg innebär Cebergs nordliga läge längre och mer frekventa perioder med närvaro av inlandsis. Ceberg är den av de tre platserna som befinner sig i isdelarzonen under längst tid.

10.4 Osäkerheter i beskrivningen av randförhållanden

SR 97:s klimatscenario avser att beskriva en utveckling som skulle kunna inträffa under nästa glaciala/interglaciala cykel. Det kan också ses som en generell beskrivning av utvecklingen under en av kvartärtidens glaciala/interglaciala cykler.

Kunskapen om jordens klimatsystem är idag inte tillräcklig för att uppskatta sannolikheten för ett visst scenario. Vi kan dock säga något om framtida klimatförhållanden. Det är t ex känt att jorden för närvarande upplever en period med varmt klimat. Det är också mycket sannolikt att klimatet någon gång i framtiden kommer att bli kallare. Att en övergång till ett kallare klimat kommer att innebära att Skandinavien någon gång kommer att täckas av is är också säkert. Det är troligt att en sådan situation kommer att inträffa någon gång under de närmaste 100 000 åren. Kunskapen om jordens klimatsystem är dock inte tillräcklig för att göra några exakta uttalanden om isutbredningen under den kommande glaciala/interglaciala cykeln.

Variationen av omloppsparametrarna och den därmed sammanhängande variationen av solinstrålningen kan beräknas i stort sett exakt. Det finns en tidsförskjutning mellan variationen i solinstrålning och klimatförändringar på jorden. Det är osäkert hur stor denna tidsförskjutning är. Uppgifterna om när klimatförhållandena kan komma att ändras kan ändå ses som relativt tillförlitliga. Detta under förutsättning att Milankovitchs teori är giltig, vilket de flesta forskare idag är överens om. Hur omfattande förändringar av klimatförhållandena som den varierande solinstrålningen kommer att leda till, t ex temperaturvariationer och isutbredning, är dock synnerligen osäkert. Osäkerheten beror på brister i beskrivningen av klimatsystemet, och dess respons på förändringar av solinstrålningen.

Simuleringar med LLN-modellen visar att den svaga variationen av solinstrålningen i kombination med mänsklig påverkan kan medföra att nuvarande varmperiod kan komma att bli extremt lång, upp mot 50 000 år. Modellen indikerar att under perioder med små variationer (liten amplitud) av solinstrålningen ökar betydelsen av klimatsystemets inre dynamik /Berger och Loutre, 1997/.

SR 97-scenariot beskriver en utveckling som liknar den vi känner från Weichselperioden. Isutbredningen är större än vad simuleringarna med LLN-modellen indikerar. Jämfört med klimatscenariot i SKB:s säkerhetsrapport SKB 91 beskriver scenariot ett varmare klimat under de inledande 70 000 åren /SKB, 1992; Ahlbom m fl, 1991/. Scenariot är en sammanvägning av nyare och äldre beräkningsresultat och geologiska data. Scenariot innehåller tre kallperioder och tre varmperioder. Under den sista av kallperioderna antas en isutbredning som motsvarar den största man känner från geologiska data. Under den sista varmperioden antas interglaciala förhållanden. Avsikten är att täcka in förändringar med betydelse för förvarets utveckling på ett sådant sätt att deras konsekvenser inte underskattas.

Då en inlandsis breder ut sig sker en omfattande erosion vid ytan. I Skandinavien ser vi därför i stort sett endast spåren efter den senaste nedisningen och perioden efter den. Det finns också vissa spår efter tidigare istäcken. För att beskriva övriga klimatförhållanden är vi beroende av geologiska och biologiska data från andra platser på jorden. Beskrivningarna av förhållandena inom de olika klimatstyrda processtillstånden grundar sig på geologiska och biologiska data, modelleringar samt undersökningar på platser som idag har klimatförhållanden som liknar dem vi förväntar oss i Sverige i framtiden. För att bedöma hur korrekta beskrivningarna är vore det önskvärt att ha mer information om de långtida variationerna av de skandinaviska klimatförhållandena (temperatur, nederbörd, m m). Sådana data används t ex vid modelleringar av isutbredning och förekomst av permafrost.

10.5 Överblick av processer och beroenden

De processer och beroenden som styr utvecklingen **inom** förvarssystemet i klimatscenariot är i huvudsak desamma som i basscenariot, se figur 10-15.

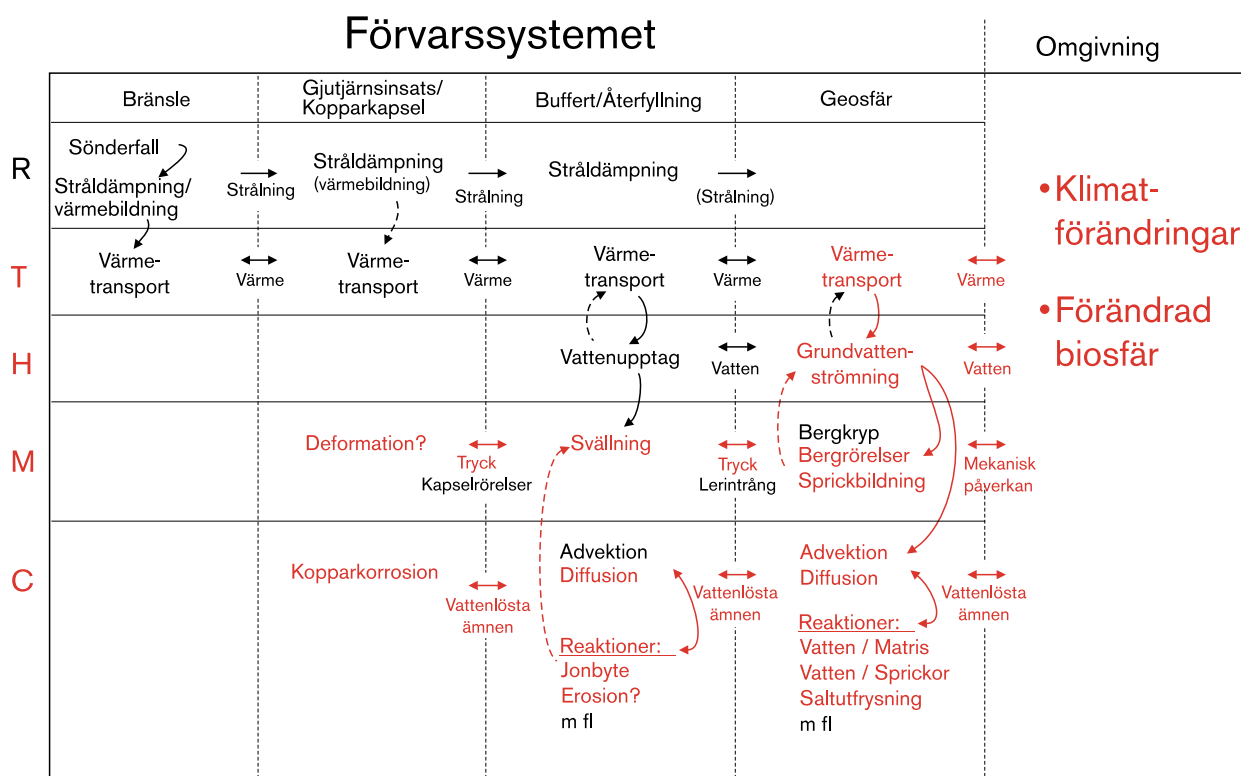
Klimatförändringarna ger dock radikalt förändrade förhållanden i förvarets omgivning och därmed förändras randvillkoren för utvecklingen inom förvaret. Klimatförändringarna blir märkbara först efter att många av de inledande, transienta förloppen i basscenariot är överspelade. Det gäller buffertens och återfyllningens vattenuptag, återställandet av det naturliga grundvattenkemiska och hydrauliska förhållandena i geosfären och väsentligen också den uppvärmning av hela förvarssystemet som orsakas av resteffekten i bränslet. Alla dessa förlopp förväntas vara i stort sett desamma som i basscenariot.

För den strålrelaterade utvecklingen förväntas samma utveckling som i basscenariot också på lång sikt.

Termiskt leder ett kallare klimat bl a till utveckling av permafrost i delar av geosfären. Därigenom fryser grundvattnet och grundvattenströmningen påverkas.

Den hydrauliska utvecklingen påverkas också kraftigt av de förändrade hydrauliska randförhållandena till följd av ändrad nederbörd, kustlinjeförskjutning och istillväxt i omgivningen. Grundvattentrycket kan öka väsentligt under en inlandsis, även infiltrationsmönstret förändras. Om en plats blir havstäckt utjämnas tryckskillnaderna i geosfären och de hydrauliska förhållandena kan bli i det närmaste stagnanta.

Mekaniskt ändras randförhållandena radikalt av tyngden från en inlandsis. Såväl den statiska lasten från istäcket som de dynamiska förloppen då is växer till och smälter ger mekaniska återverkningar i förvarsberget. Samspelet mellan den mekaniska lasten och det



Figur 10-15. Huvuddragen i processystemet för klimatscenariot. Röda processer har ett annat förlopp eller annan omfattning jämfört med basscenariot.

höga grundvattentrycket kan leda till att sprickor både vidgas, s k hydraulisk spjälkning, och sluts och därmed påverkas grundvattenflödet, dvs man får en återkoppling till den hydrauliska utvecklingen.

Kemiskt förändras randförhållandena jämfört med basscenariot genom att syrerikt vatten tränger ner i berggrunden utan att syret förbrukas i ett organiskt markskikt, eftersom detta förväntas vara utplånat under stora delar av en glacial cykel. Syret förbrukas i stället i huvudsak genom reaktioner med geosfärens mineral.

Klimatförändringarna ger även förändringar i grundvattnets salthalt. Dels förekommer saltutfrysning då permafrost bildas. Processen innebär att salt drivs ut ur frystande vatten så att det ofrusna vattnet får en högre salthalt. Dels ger de förändrade flödesförhållandena i geosfären nya förutsättningar för transport och blandning av vatten från olika partier av geosfären och infiltrerande ytvatten. Resultatet kan bli både högre och lägre salthalter än i basscenariot. Den förändrade grundvattensammansättningen ger framför allt en påverkan på jonbytesförloppet och svälltryckets utveckling i bufferten.

Eventuell radionuklidtransport i förvarssystemet påverkas framför allt av de förändrade hydrauliska förhållandena.

10.6 Strårelaterad utveckling

Den strårelaterade utvecklingen som beskrivs i basscenariot påverkas inte av klimatförändringar.

10.7 Termisk utveckling

Den termiska utvecklingen är kopplad till den mekaniska och den kemiska. I basscenariot beräknas den maximala temperaturen på kapselytan samt temperaturen i förvaret som helhet. Den maximala temperaturen på kapselytan nås efter 10–15 år och påverkas därmed inte av klimatförändringar. Förändringar av årsmedeltemperaturen påverkar temperaturen i berget. Temperaturförändringarna i berget avtar med djupet och är alltid mindre än temperaturvariationerna vid ytan.

Under en glacial/interglacial cykel kan temperaturvariationen⁴ på våra breddgrader uppskattas till cirka 10–15 °C mellan de kallaste och varmaste perioderna /baserat på Boulton och Curle, 1997; Boulton m fl, 1995; Guiot m fl, 1989; Holmgren och Karlén, 1998/. Idag varierar årsmedeltemperaturen mellan cirka –3 och 9 °C från norr till söder /Raab och Vedin, 1995/. Under nuvarande interglacials varmaste skede kan temperaturen ha varit 2–3 °C högre än idag /Bogren m fl, 1998; Holmgren och Karlén, 1998; Losjö m fl, 1998/.

10.7.1 Tempererat/borealt tillstånd

Årsmedeltemperaturen inom det tempererade/boreala tillståndet kan kanske vara uppemot 5 °C högre än idag. Övergång till permafrosttillstånd kan ske vid en årsmedeltemperatur runt –1 °C. Årsmedeltemperaturens variation inom det tempererade/boreala tillståndet är i samma storleksordning som avvikelserna i årsmedeltemperatur mellan de tre förvarsplatserna. Dess betydelse för temperaturutvecklingen är därmed behandlad inom basscenariot.

10.7.2 Permafrosttillstånd

Under perioder med permafrost kan temperaturen sjunka med cirka 8–15 °C från dagens. Idag finns inga geologiska evidens på gångna tiders permafrostdjup tillgängliga. Boulton och Payne har simulerat is- och permafrostutbredning under Weichsel /Boulton och Payne, 1992/. I modellen antogs temperaturen variera med topografien. I ett beräkningsfall då temperaturen vid havet som lägst var –10 °C beräknades det maximala permafrostdjupet i Sverige till cirka 300 meter. Då minimitemperaturen vid havet antogs vara –5 °C blev permafrostdjupet drygt 100 meter.

Värmen från det använda bränslet kommer att påverka permafrostdjupet. Permafrost förväntas tidigast om flera tusentals år. Då har värmen från bränslet avtagit betydligt, och förvaret och berget runt det har en jämn temperatur. Minskningen av permafrostdjupet förväntas bli relativt liten. Permafrost kommer att bidra till en lägre temperatur i berget i relation till basscenariot. Sänkningen av temperaturen som det kallare klimatet medför avtar med djupet /Delisle, 1998/ och kan aldrig överskrida temperaturminskningen i atmosfären. På förvarsdjup nås inte fryspunkten, och någon direkt termisk påverkan på förvaret bedöms inte kunna förekomma.

10.7.3 Glacialt tillstånd

Inom isdelarzonen är marken frusen. Under de centrala delarna av isdelarzonen kan permafrostdjupet vara upp emot 400 meter /Boulton och Payne, 1992/. I smältzonen uppnås trycksmältpunkten. Temperaturen är under 0 °C, och definitionsmässigt råder

⁴ Ingen hänsyn tagen till topografien och dess förändringar i samband med en glaciation.

alltså permafrost trots att marken inte är frusen. Nära iskanten är trycken lägre och marken kan vara frusen. Permafrostdjupen är betydligt mindre än i isdelarzonen. Inverkan på den termiska utvecklingen är densamma som i permafrosttillståndet.

10.7.4 Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna

Aberg

Om cirka 15 000 år ligger hela Abergområdet under havets yta. Årsmedeltemperaturen kan då vara cirka 5 °C lägre än idag, dvs runt 2 °C. Aberg fortsätter att ligga under havets yta ända till nästa interglacial. Med undantag av de perioder inlandsisen når Aberg håller sig temperaturen i berggrunden över noll grader. Då Aberg befinner sig under istäcket sjunker temperaturen i berget till mellan 0 och –3 °C närmast ytan. Isen förväntas inte nå Aberg förrän om 64 000 år. Perioden 95 000–112 000 år ligger Aberg åter under isen och temperaturerna sjunker. Vid en jämförelse med basscenariot bedöms klimatförändringarna ha marginell betydelse för temperaturutvecklingen i geosfären, och därmed också i övriga förvarsdelar vid Aberg.

Beberg

Även Beberg kommer så småningom att hamna under havets yta. Innan de högsta partierna av Bebergområdet täcks av vatten om cirka 18 000 år, kan årsmedeltemperaturen ha hunnit sjunka till –2 °C till –3 °C. Någon permafrost förväntas dock inte på grund av det kustnära läget. Även vid Beberg håller sig temperaturerna på plussidan med undantag av perioderna då området är istäckt. Under perioden 100 000–108 000 år ligger Beberg i isdelarzonen och temperaturerna sjunker avsevärt. Permafrost kan råda på ned till kring hundra meters djup. Liksom vid Aberg bedöms klimatförändringarna ha marginell betydelse för den termiska utvecklingen i geosfären, och därmed också i övriga förvarsdelar.

Ceberg

Vid Ceberg kan diskontinuerlig permafrost förekomma innan havet stiger och täcker hela området om cirka 20 000 år. Permafrostdjupen kan vara kring 50 meter, och relativt stora områden med ofrusen mark antas finnas. Ceberg befinner sig i iskantzonen om cirka 24 000 år, då kan marktemperaturen ligga runt –2 °C. Ceberg ligger i isdelarzonen i två skeden 60 000–68 000 år och 93 000–111 000 år. Under dessa perioder kan permafrostdjup på ned mot ett par hundra meter förekomma. Inte heller vid Ceberg bedöms klimatförändringarna ha någon större betydelse för den termiska utvecklingen.

10.7.5 Utvecklingen i närzonen

Temperaturförändringar i berget på grund av klimatförändringar är av underordnad betydelse för den termiska utvecklingen i närzonen.

10.7.6 Slutsatser

Temperaturförändringar på grund av variationer i klimatet kräver inga utredningar av den termiska utvecklingen utöver det som redovisats i basscenariot.

10.8 Hydraulisk utveckling

Den hydrauliska utvecklingen är kopplad till den mekaniska och den kemiska. I basscenariot beskrivs den hydrauliska utvecklingen under förutsättning att dagens förhållanden och trender kommer att råda även framgent. Det betyder att de variationer som kan förväntas inom det tempererade/boreala tillståndets interglaciala regim redan har belysts.

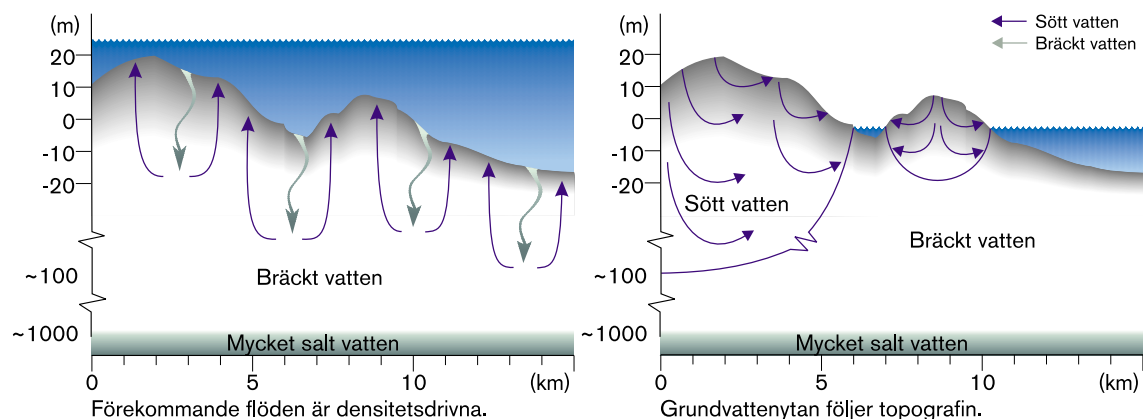
10.8.1 Tempererat/borealt tillstånd

Klimatvariationer inom det tempererade/boreala tillståndet påverkar grundvattenbildning, djupet på sjöar samt flödena i vattendrag. De mest betydelsefulla förändringarna är relaterade till hastighet och riktning hos kustlinjeförskjutningen. Förändringarna har störst betydelse i kustlägen.

Under perioder med regression sjunker den relativa kustlinjen. Områden som tidigare varit havsbotten blir land. Då ett område ligger under havet drivs grundvattenflödet av densitetsskillnader och salt vatten tränger ned i berggrunden. Då området stiger ur havet blir den nya landytan tillgänglig för infiltration av nederbördsvattnet. Grundvattenytan och därmed den hydrauliska gradienten kommer, på grund av det fuktiga klimatet, att följa topografin. Det söta nederbördsvattnet tränger undan och blandas med det saltare vattnet. Förvarets läge relativt havet höjs. På en plats som innan regressionen legat invid kusten ökar gradienterna för grundvattenflöde. Utvecklingen visas schematiskt i figur 10-16.

Regression på grund av sänkning av havsytan förekommer vid inledningen av det preglaciala skedet. Den snabbaste regressionen sker dock på grund av landhöjning i inledningen av det postglaciala skedet. Allra snabbast sker regressionen i de områden som legat närmast det avsmältande istäckets centrala delar /Boulton, 1990 i Boulton m fl, 1999a/.

Under perioder av transgression stiger den relativa kustlinjen. Områden som tidigare varit land förvandlas till havsbotten. Under havsytan existerar inte längre någon hydraulisk gradient orsakad av topografin. Salt vatten tränger på grund av densitets-



Figur 10-16. Den hydrauliska utvecklingen vid regression.

skillnader ned i berggrunden. Förvarets läge relativt havet sänks. På en plats som innan transgressionen låg invid kusten minskar gradienterna för grundvattenflöde. Utvecklingen blir den omvända mot den som visas i figur 10-16.

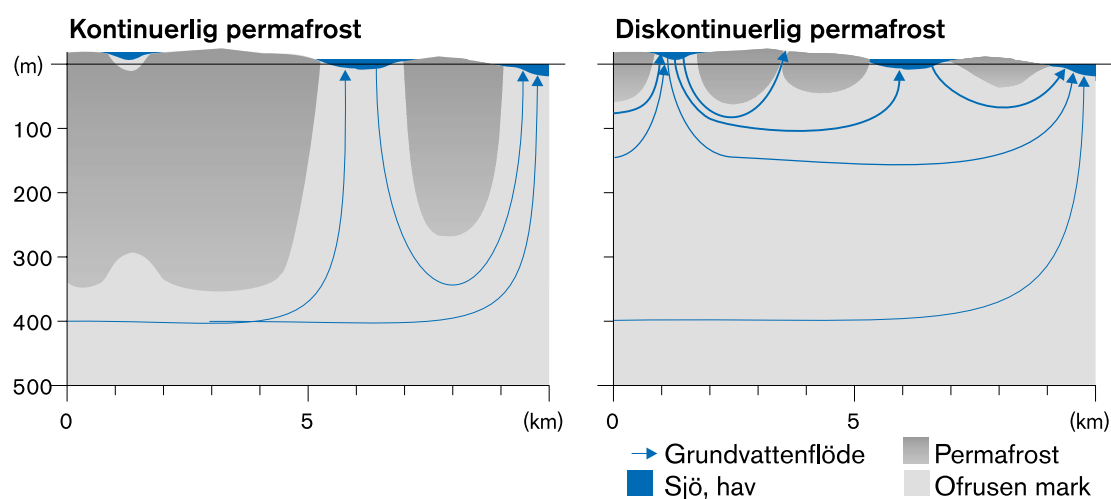
Transgressionen är som kraftigast i slutet av den preglaciala regimen, då det växande istäcket allt mer trycker ned jordskorpan. Liksom för regressionen är förändringarna störst i områden nära isens centrala delar.

10.8.2 Permafrosttillstånd

Minskad nederbörd och frusen mark gör att grundvattenbildningen blir mycket liten. I områden med kontinuerlig permafrost omsätts i stort sett all nederbörd vid ytan /French, 1996/.

Grundvattenflödet begränsar sig till ofrusna partier, så kallade talikar. Temperaturen kan vara under 0 °C i en talik. Talikarna kan vara öppna eller slutna. Öppna talikar står i kontakt med det aktiva lagret. I den kontinuerliga zonen förekommer öppna talikar under stora sjöar och vattendrag. Slutna talikar kan förekomma under mindre sjöar och vattendrag, eller som en kvarleva från en varmare period t ex i en lerlins /French, 1996/.

De icke permeabla partierna med frusen mark medför att grundvattenflödet drivs till ett större djup. Frusna icke permeabla områden kan uppta en stor del av ytan. Även de öppna partierna är tillfrusna under större delen av året. Vattenomsättningen och flödet i berggrunden blir därför litet i förhållande till situationen vid tempererat/borealt tillstånd. Vattenomsättningen minskar på grund av den begränsade infiltrationen, men även till följd av den längre väg som flödet tvingas gå i berget, trots att stora gradienter kan förekomma lokalt. Det gäller i synnerhet i de övre delarna av berggrunden. På stort djup kan förekommande flöden drivas av regionala gradienter. Regionala gradienter skulle kunna upprätthållas via talikar, t ex mellan två sjöar. En schematisk skiss över flödessituationen visas i figur 10-17.



Figur 10-17. Grundvattenflöden vid permafrost.

10.8.3 Glacialt tillstånd

Grundvattenflöde under ett istäcke uppstår av två orsaker /Boulton m fl, 1999a/:

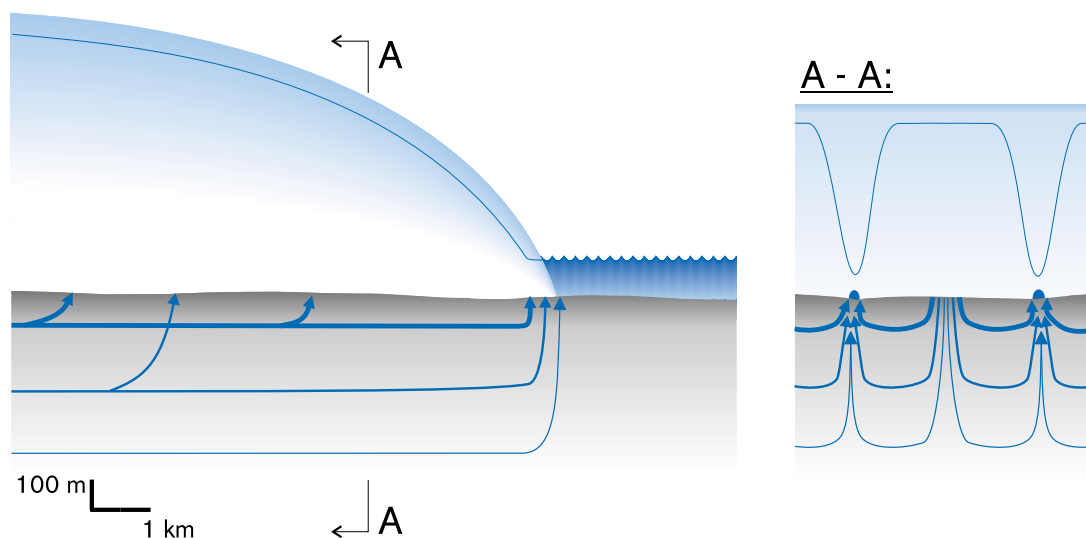
1. Inflöde av smältvatten.
2. Sammanpressning (konsolidering) av berggrunden.

I isdelarزونen är mark och istäcke frusna, inget smältvatten avges från isen och varken grundvattenflöde eller tryckgradienter förekommer. Grundvattenytan är horisontell och motsvaras av trycket vid gränsen mot smältzonen. Istrycket överskrider grundvattenstrycket och effektivspänningarna är höga (se avsnitt 10.9.3). Berggrunden sammanpressas i relation till den ökande ismaktigheten och ett begränsat grundvattenflöde ut ur zonen uppstår. Bortsett från denna process kan förhållandena anses vara stagnanta i isdelarزونen.

I smältzonen smälter isen i gränsskiktet mellan is och mark, under sommaren tillförs även smält- och regnvatten från ytan. Smältvattnet drivs mot iskanten av en tryckgradient som följer istäckets lutning. Från iskanten ökar vattentrycket successivt i relation till istjockleken. De maximala vattentrycken nås vid gränsen mellan smältzon och isdelarزون. Tryckets storlek beror på isens temperatur och tjocklek. De maximala vattentrycken kan vara mellan 20 och 25 MPa (uppskattning baserad på Boulton och Payne /1992/). Smältvattnet pressas ned i berggrunden och på grund av berggrundens låga vattengenomsläpplighet stiger vattentrycket. Där vattentrycket överskrider istrycket bildas kanaler i gränsskiktet mellan isen och marken, se avsnitt 10.3.6. Kanalerna, eller istunnlarna, ger upphov till lokala sänkor av vattentrycket, och tryckgradienterna in mot tunnarna kan vara betydande. I området mellan istunnlarna styrs grundvattenflödet av avståndet till tunnarna och isens topografi. Den största delen av flödet mot iskanten förväntas att ske genom istunnlarna. Grundvattenflödet sker huvudsakligen in mot istunnlarna /Boulton m fl, 1999b/. När man närmar sig iskanten ökar isens lutning och därmed även gradienterna för grundvattenflöden.

Vid iskanten, och även in mot istunnlarna, är gradienterna för grundvattenflöden höga. Grundvattenflöde sker både in mot tunnarna och ut mot iskanten. Den snabbt minskande istjockleken gör att trycket blir lägre, trycksmältpunkten uppnås inte och marken är frusen. Den termiska kapaciteten av smältvattenflödet i tunnarna förmår dock att hålla marken ofrusen i anslutning till dem. Då isen avancerar över ett område med permafrost för den med sig sitt system av tunnlar. I de frusna zonerna mellan tunnarnas mynningar drivs grundvattnet till större djup och gradienterna, både in mot tunnarna och ut mot det isfria området ökar. Hur stora gradienterna kan bli beror på istäckets lutning och permafrostens utbredning, både djup och utsträckning från iskanten har betydelse. Där isen slutar i havet förekommer ingen permafrost i iskantzonen. Flödessituationen i smält- och iskantzonen skisseras i figur 10-18.

Isfrontens framryckningshastighet är i storleksordningen 10 m/år (uppskattning baserad på Boulton och Payne /1992/). Den maximala framryckningshastigheten kan vara några tiotals meter per år. Isen drar sig tillbaka betydligt fortare än den växer till. Vid den senaste isavsmältningen drog sig isfronten tillbaka över Sverige med i storleksordningen 100 m/år. I Norrlands inland kan reträtthastigheten ha varit uppemot 1 000 m/år (uppskattat ur kartbild i Fredén /1994/). Isytans lutning kan vara mellan 1 och 10 promille, den ökar i anslutning till iskanten /Boulton och Payne, 1992/. Det betyder att vattentrycket kan öka med i storleksordningen 0,1 till 1 kPa/år då isen växer till. Då isen drar sig tillbaka kan trycket minska med i storleksordningen 1 till 100 kPa/år.



Figur 10-18. Grundvattenflöde i smält- och iskantzonen. Iskanten ligger i havet.

10.8.4 Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna

Aberg

Under den inledande perioden sker en sänkning av den relativa kustlinjen. Regressionen medför att gradienterna för grundvattenflöde ökar. Svensson /1999b/ har simulerat utvecklingen vid Aberg under perioden från 10 000 år innan nutid och 5 000 år framåt i tiden. För 7 000 år sedan låg Aberg under havets yta. Då området ligger under havsytan är de beräknade flödena på förvarsdjup extremt små, och förhållandena i det närmaste stagnanta. Då området stiger upp ur havet ökar flödena och blir som störst om 5 000 år, då den relativa kustlinjen är som lägst. Flödena på förvarsdjup har då beräknats till cirka fem gånger de nuvarande flödena.

Om cirka 5 000 år vänds regressionen mot en tilltagande transgression. Allt eftersom kustlinjen stiger minskar tryckgradienterna för grundvattenflöde. Efter cirka 15 000 år är hela Abergområdet täckt av vatten. Kustlinjen fortsätter att stiga. När hela området ligger under havets yta drivs grundvattenflödena av densitetsskillnader. Det saltare havsvattnet tränger undan sötvattnet i berget. Flöden och vattenomsättning minskar relativt basscenariot.

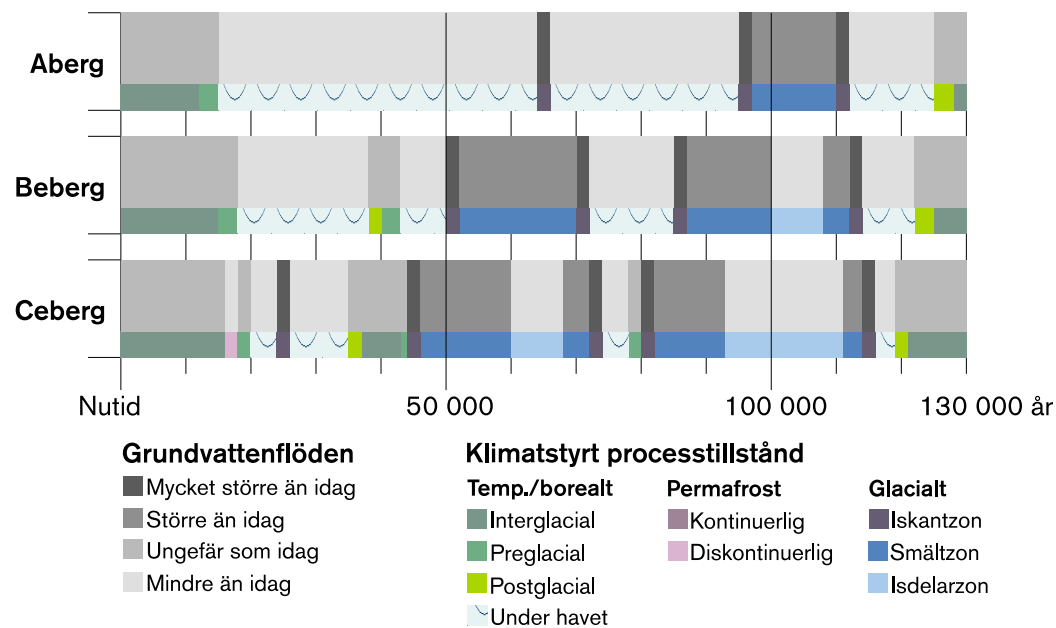
Om cirka 64 000 år når isfronten Aberg som då befinner sig i iskantzonen. Iskanten ligger i havet. När isen närmar sig uppträder åter tryckgradienter. Isens utbredning varierar under perioden, och isfronten kan ligga på ett avstånd av 0–10 km från själva förvaret. Den maximala istjockleken kan under perioden uppgå till några hundra meter. De maximala vattentrycken kan uppgå till några hundra kPa, och uppträder i området mitt emellan två istunnlar. Gradienter och flöden styrs av isens topografi och av förekomsten av istunnlar. Lokalt förekommer mycket stora gradienter och sött, syrerikt smältvatten infiltrerar berggrunden. Flöden och vattenomsättning ökar relativt basscenariot. Grundvattenflödena för en situation då isfronten befinner sig rakt över Äspö har beräknats av Svensson /1999a/ (se även figur 10-21 samt avsnitt 1.10.3). På basis av dessa beräkningar samt de ovan nämnda simuleringarna /Svensson, 1999b/ bedöms ökningen av flödena då området ligger i iskantzonen bli betydligt större än vid regression.

Då isen drar sig tillbaka ligger Aberg under havsytan. Tryckgradienterna försvinner och förekommande flöden drivs åter av densitetsskillnader. Förhållandena är i stort sett desamma – även om havsytenivån varierar – till isen åter närmar sig Aberg.

Om cirka 95 000 år når isfronten åter Aberg. Området befinner sig i iskant- eller smältzonen ända till inledningen av nästa interglacial. Den maximala istjockleken kan uppgå till cirka 2 000 meter, vilket innebär en maximal ökning av vattentrycket med knappt 20 MPa. Efter cirka 112 000 år lämnar isen Abergområdet, som då åter befinner sig under havets yta. En cirka 17 000 år lång period med ökade flöden bryts därmed.

Aberg förblir sedan under havsytan i cirka 13 000 år och därefter stiger de högst belägna delarna upp ur havet. Tryckgradienterna följer topografin och allteftersom landet stiger ökar gradienterna. Förhållanden liknar allt mer dagens. Eftersom interglacialen är både kortare och kallare än den nuvarande fortsätter kustlinjen att ligga över dagens ända till nästa kallperiod tar vid och en ny glacial/interglacial cykel inleds.

Perioden från 15 000 till 125 000 år från idag antas Aberg ligga helt under havets yta. Det betyder att, med undantag av de perioder isen passerar Aberg, gradienter och grundvattenflöden kommer att vara betydligt mindre än de nuvarande. En jämförelse av förekommande grundvattenflöden gentemot dagens situation görs i figur 10-19.



Figur 10-19. En jämförelse mellan dagens grundvattenflöden vid Aberg, Beberg och Ceberg och flödena under de olika skedena av nästa glaciala/interglaciala cykel.

Beberg

Beberg ligger längre norrut och längre från kusten än Aberg. Det innebär att påverkan av den inledande sänkningen av den relativa kustlinjen blir mindre än vid Aberg. Vid istillväxt blir Beberg vattentäckt i ett senare skede. Beberg hinner också – till skillnad från Aberg – stiga upp över havsytan under den varmare av cykelns båda interstadialer. Beberg är istäckt under längre perioder än Aberg, och den maximala istjockleken är större vilket innebär längre perioder med ökade grundvattenflöden, och större maximala grundvattentryck. Den maximala ökningen av grundvattentrycket kan vid Beberg nå upp emot 25 MPa. Vid den glaciala/interglaciala cykelns maximala isutbredning ligger Beberg i isdelarzonen under en cirka 8 000 år lång period. Under denna period förekommer inga gradienter för grundvattenflöden och förhållandena är i det närmaste stagnanta. En jämförelse av förekommande grundvattenflöden gentemot dagens situation görs i figur 10-19.

Ceberg

Ceberg ligger ännu längre från den nuvarande kusten och ännu längre norrut än Beberg. Här kommer den inledande perioden med sjunkande relativa havsytor att ha mycket liten betydelse för den hydrauliska utvecklingen. En period med diskontinuerlig permafrost inträffar om 16 000–18 000 år. Under denna period och de följande 2 000 åren då Ceberg successivt täcks av vatten minskar grundvattenomsättningen.

Perioderna då Ceberg är istäckt är fler och längre än vid Aberg och Beberg. Jämfört med Aberg är perioderna med ökade grundvattenflöden längre. Jämfört med Beberg är de däremot kortare. Det beror på att Ceberg befinner sig i, eller nära, isdelarzonen under fler och längre perioder. Den maximala ökningen av grundvattentrycken är jämförbar med den vid Beberg. Visserligen är istjockleken större vid Ceberg, men då istjockleken är som störst ligger området i isdelarzonen. En jämförelse av förekommande grundvattenflöden gentemot dagens situation görs i figur 10-19.

10.8.5 Utvecklingen i närzonen

Klimatrelaterade förändringar påverkar grundvattentryck och grundvattenflöden. Inom det glaciala tillståndet förväntas betydligt större tryck och flöden än i basscenariot. Ökade flöden förväntas framför allt i anslutning till iskanten men även inom smältzonen. Höga vattentryck kan påverka kapseln mekaniskt, detta diskuteras i avsnitt 10.9.5. Höga grundvattenflöden på förvarsdjup påverkar den möjliga intransporten av korrosiva ämnen till kapselytan, samt tillförseln av ämnen som kan påverka buffertens funktion. Dessa aspekter diskuteras i samband med den kemiska utvecklingen, avsnitt 10.10.5. Under permafrosttillstånd, inom isdelarzonen, samt då en plats förvandlas till havsbotten minskar flödena relativt dagens. Den möjliga tillförseln av ämnen påverkas förutom av flödet också av grundvattnets sammansättning.

Hydraulisk utveckling i en defekt kapsel

Förändringar av vattentrycket då en inlandsis rör sig över ett område kommer att påverka in- och utflödet till/från en defekt kapsel. Förekommande tryck diskuteras ovan. Här antas att isens maximala framryckningshastighet är 20 meter per år och att isfronten drar sig tillbaka med en hastighet av 10–500 meter per år. Det maximala vattentrycket antas bli 25 MPa, vilket motsvarar en istjocklek av cirka 2 700 meter i gränsen mellan smält- och isdelarzon.

Då inlandsisen närmar sig bedöms en initialt defekt kapsel ha ett internt vätgastryck från korrosion av insatsen som motsvarar (eller överstiger) det hydrostatiska trycket i berget, se avsnitt 9.1.7. Gastrycket gör att inget vatten kan strömma in i kapseln. Vatten kan endast komma in i kapseln genom diffusion i ångfas. Korrosionen av insatsen styrs av intransporten av vatten. Detta medför att endast en begränsad del av insatsen kommer att korrodera.

Då en inlandsis rör sig över ett område höjs det hydrostatiska trycket i förvaret. En tryckgradient skapas över bufferten. Gradienten medför att vatten strömmar in i kapseln. På grund av den ökade vattentillgången förväntas korrosionen öka över hela insatsens yta. Vattenintransporten kan pågå så länge tryckgradienten finns kvar. Om hela insatsens yta antas vara tillgänglig för korrosion, korrosionshastigheten är $0,1 \mu\text{m}/\text{år}$ och vattentillgången är obegränsad beräknas tryckökningen i kapseln bli cirka $2 \text{ kPa}/\text{år}$. Med de antagna värdena på isytans lutning och isfrontens framryckningshastighet betyder det att gastrycket i kapseln och vattentrycket i berget byggs upp i samma takt. Vatteninträgningsprocessen skiljer sig principiellt inte från den initiala vatteninträgningen i en defekt kapsel, se avsnitt 9.1.7.

Gas kan transporteras ut från en defekt kapsel om det interna gastrycket överstiger summan av det hydrostatiska trycket i berget och buffertens svälltryck (se avsnitt 9.1.7). För att gastransport ska kunna äga rum måste gasöverttrycket i kapseln minst motsvara buffertens svälltryck. Då isen växer till och trycket successivt byggs upp är det inte troligt att någon gastransport kommer att ske, även om trycksänkningar i anslutning till istunnlar kan förekomma.

Då en inlandsis rör sig över förvaret kan det hydrostatiska trycket öka med $20\text{--}25 \text{ MPa}$. Gastrycket i kapseln kan öka till en nivå som motsvarar de maximala vattentrycken. När isen når sin maximala mäktighet kan gastrycket inuti en defekt kapsel vara kring 30 MPa , vilket motsvarar 25 MPa istryck och $5\text{--}6 \text{ MPa}$ från vattnet i förvarsberget. När isen drar sig tillbaka sjunker det hydrostatiska trycket. När trycket på förvarsnivå sjunkit till en nivå motsvarande gastrycket i kapseln minus buffertens svälltryck, dvs cirka 22 MPa , kan en gaskanal öppnas i bufferten. Gas strömmar ut från kapseln. Gaskanalen står öppen tills tryckgradienten över bufferten sjunkit till buffertens s k ”stängningstryck”, se avsnitt 9.1.7. Isen fortsätter att dra sig tillbaka och det hydrostatiska trycket fortsätter sjunka. Kanalen öppnas igen när det hydrostatiska trycket sjunkit till ett värde lägre än gastrycket i kapseln minus buffertens svälltryck. Den säkerhetsmässiga betydelsen av gastransport genom bufferten utreds i kapseldefekts scenariot, avsnitt 9.6.5.

10.8.6 Slutsatser

Under en glacial förändras grundvattenflödena, de kan både öka och minska relativt dagens situation. På samtliga tre platser kommer grundvattenflödena att vara mindre eller jämförbara med dagens flöden under den största delen av den kommande glaciala/interglaciala cykeln. Vid Aberg gäller det cirka 85 procent av tiden, vid Beberg och Ceberg knappt 70 procent. Grundvattenflödena kan förväntas vara större än idag då områdena befinner sig i smält- eller iskantzonen, störst ökning av flödena kan förväntas i iskantzonen. Av de tre platserna befinner sig Beberg i smält- eller iskantzonen under långst tid, Ceberg ligger dock vid iskanten under något längre tid.

10.9 Mekanisk utveckling

Den mekaniska utvecklingen är kopplad till den termiska och den hydrauliska. I basscenariot beskrivs den mekaniska utvecklingen orsakad av de påfrestningar förvaret utsätts för under buffertens mättnadsfas, värmepulsen från det använda bränslet och långsiktiga storskaliga tektoniska rörelser. Klimatförändringar bedöms inte påverka mättnadsfasen. De temperaturvariationer som kan förekomma på grund av klimatförändringar är små i relation till de som genereras av det använda bränslet och bedöms generellt ha underordnad termomekanisk betydelse. Utvecklingen av ett istäcke har betydelse för de storskaliga tektoniska rörelserna.

10.9.1 Tempererat/borealt tillstånd

Utöver det som beskrivs inom basscenariot bedöms landhöjning/nedtryckning vara den enda signifikanta klimatrelaterade mekaniska process som förekommer inom det tempererade/boreala tillståndet. Processens betydelse för den mekaniska utvecklingen diskuteras i avsnitt 10.9.3 Glacialt tillstånd samt i kapitel 11 Tektonik – jordskalvs-scenario.

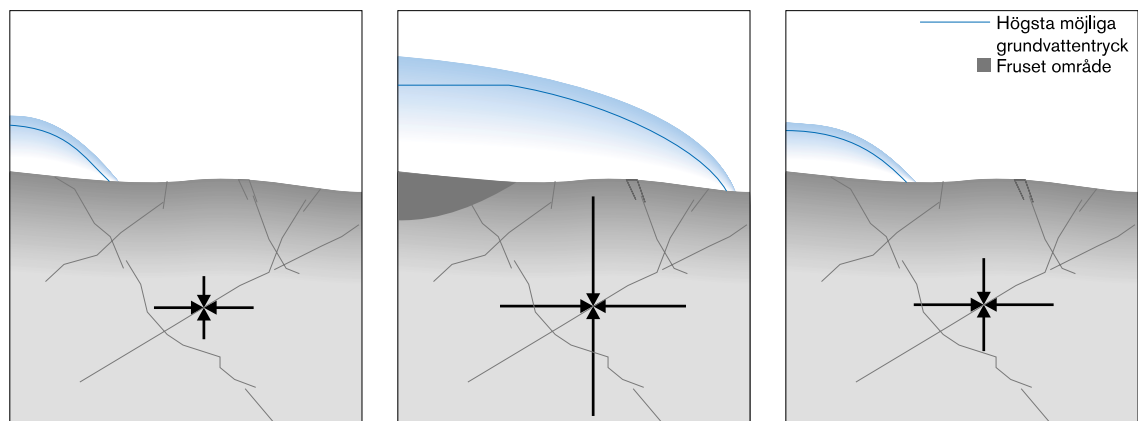
10.9.2 Permafrosttillstånd

När vattnet i bergets sprickor fryser expanderar det och utövar ett tryck mot sprickyrtorna och sprickorna vidgas. Eftersom deformationen inte är helt elastisk är vidgningen delvis permanent /Boulton m fl, 1999a/. Frysning bedöms inte kunna förekomma på förvarsdjup.

Vid permafrosttillstånd är temperaturen vid ytan betydligt lägre än idag. Till skillnad från värmen genererad av det använda bränslet, som ger lokala spänningskoncentrationer i och omkring den uppvärmda bergvolymen, inverkar klimatförändringar endast på de vertikala temperaturgradienterna. Inverkan är likformig över stora areor och bedöms vara av underordnad betydelse för förvarets mekaniska utveckling.

10.9.3 Glacialt tillstånd

Då en inlandsis rör sig över ett område påverkas bergspänningarna. Under isfria förhållanden förväntas den största huvudspänningen vara horisontell ned till ett djup av cirka 400–500 meter /Stephansson, 1993 i Boulton m fl, 1999a/. De horisontella spänningarnas storlek kan förmodligen kopplas till tektoniska rörelser. De vertikala spänningarna motsvarar i princip tyngden av överliggande bergmassa. Då en is tynger ned berggrunden ökar i första hand de vertikala spänningarna, men även de horisontella spänningarna kommer att öka. Inlandsisens tyngd medför att jordskorpan (litosfären) trycks ned (se figur 10-13), vilket ger upphov till en böjning av jordskorpan. Nedböjningen av jordskorpan medför att tillskottet till horisontalspänningarna är olika på olika avstånd från isranden /Rehbinder och Yakubenko, 1998/. Då isen drar sig tillbaka minskar spänningarna. Efterhand återgår spänningstillståndet till det som rådde innan isen passerat över området. Det horisontella spänningstillskottet kvarstår längre än det vertikala. Förutom av islasten påverkas spänningarna av rådande vattentryck /Boulton m fl, 1999a/. Spänningarnas förändringar och maximala vattentryck visas i figur 10-20.



Innan isen når platsen dominerar de horisontella spänningarna.

Då ett istäcke med stor mäktighet överlagrar platsen kan vi förvänta oss ett överskott på vertikala spänningar.

Efter det att isen har smält bort avlastas de vertikala spänningarna fortare än de horisontella, vilket kan medföra att horisontella och flackt stupande sprickor vidgas.

Figur 10-20. Spänningarna i berget varierar då en inlandsis rör sig över ett område.

I isdelarزونen där istäcket är som tjockast, kan det förekomma istjocklekar på uppemot 3 500 meter. De totala spänningarna, dvs den sammanlagda effekten av bergspänningarna utan islast och spänningarna orsakade av islasten, är höga. Marken är frusen, vattentrycket motsvaras av trycket vid kanten mot smältzonen. Vattentrycket (grundvattenytan) är lägre än istrycket (isytan). Det medför att även de effektiva spänningarna, dvs totalspänningarna reducerade med vattentrycket är stora. Berggrunden sammanpressas (konsolideras) och sprickor trycks ihop. Beroende på att spänningstillskottet är anisotrop trycks sprickor orienterade i olika riktningar ihop olika mycket. Vattengenomsläppligheten förändras både till storlek och riktning. Hoptryckningen medför generellt en reducerad vattengenomsläpplighet. Det förändrade spänningstillståndet kan dock innebära att skjuvrörelser längs vissa kritiskt orienterade sprickor äger rum. Skjuvningen kan leda till att dessa sprickor vidgas /Rosengren och Stephansson, 1990; Israelsson m fl, 1992 i Boulton m fl, 1999a/.

I smältzonen är istjockleken mindre. Vattentrycket är som mest lika med istrycket. I anslutning till istunnlarna är vattentrycket lägre. Effektivspänningarna är som minst i området mellan två istunnlar och ökar i riktning mot istunneln. I områden där vattentrycket överskrider den minsta spänningen över en spricka sker s k hydraulisk spjälkning. Vid en istjocklek på 1 000 meter har djupet till vilket hydraulisk spjälkning kan förekomma uppskattats till 60 meter (istjockleken/16) /Lindblom, 1997/. Då isen drar sig tillbaka kvarstår de ökade horisontalspänningarna. I kombination med minskade vertikalspänningar och höga vattentryck kan det leda till skjuvning och vidgning av flackt orienterade sprickor. Sediment kan injekteras i sprickorna på grund av de höga trycken /Leijon och Ljunggren, 1992 i Boulton m fl, 1999a/.

Generellt antar man att islasten kommer att ha en stabiliserande effekt som kommer att undertrycka seismisk aktivitet. Vid deglaciation kan den töjningsenergi som lagrats under istäcket komma att frigöras. En ökad seismisk aktivitet och stora jordskalv kan därför förväntas då isen drar sig tillbaka. Detta diskuteras i kapitel 11, Tektonik – jordskalvs-scenario.

10.9.4 Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna

Aberg

Den mekaniska utvecklingen påverkas framför allt av isens närvaro. Aberg ligger i iskantzonen mellan 64 000 och 66 000 år, då istäcket når stadialens maximala utbredning. Området ligger under havets yta. Där is och hav möts antas istjockleken vara cirka 1,1 gånger havsdjupet, dvs istrycket och vattentrycket är lika stort. De totala spänningarna ökar med istjockleken. Om istryck och vattentryck är lika stora är effektivspänningarna desamma som vid isfria förhållanden. Detta gäller således vid iskanten. Från iskanten ökar istjockleken med en meter på 50–150 meter, de totala spänningarna ökar i motsvarande grad. I området mellan två istunnlar är istryck och vattentryck ungefär lika stora och effektivspänningarna motsvarar dem som råder under isfria förhållanden. Vid istunnlarna är vattentrycken lägre och effektivspänningarna högre än under isfria förhållanden.

Under perioden rör sig isfronten ovanför förvaret och istjockleken kan variera i storleksordningen 100 meter. Den maximala istjockleken vid Aberg är några hundra meter (havsdjupet + cirka 100 meter). Det vertikala spänningstillskottet är av storleksordningen 1 MPa. Detta spänningstillskott bedöms ha begränsad inverkan på förvarsbergets sprickgeometri. Då isen täcker området kan dock hydraulisk spjällkning förekomma nära ytan.

Efter 95 000 år når isfronten åter Aberg. Området är sedan istäckt i cirka 17 000 år. Då isen når Aberg ligger området under havets yta, och situationen liknar den som beskrivs ovan. Till skillnad från tidigare fortsätter isen att expandera. Då den når sin maximala utbredning om cirka 105 000 år, bedöms istjockleken vid Aberg vara drygt 2 000 meter. Is- och vattentryck är således mycket högre under denna period. De totala spänningarna ökar. Aberg ligger i smältzonen. Effektivspänningarna mellan två istunnlar motsvarar dem under isfria förhållanden. Effektivspänningarna ökar i anslutning till istunnlarna. Eftersom is- och vattentryck är högre blir ökningen av både total- och effektivspänningar större än i det förra skedet Aberg var istäckt. Då isen drar sig tillbaka om cirka 110 000 år finns betydande kvarstående horisontella spänningsökningar. I detta skede kan flackt orienterade sprickor öppnas och ge utrymme för ökade grundvattenflöden.

Sett över hela den glaciala/interglaciala cykeln har berggrunden tryckts ned i tre omgångar. Då isen drar sig tillbaka stiger berggrunden åter. Denna process kan – eventuellt i kombination med spänningar orsakade av plattetektoniska rörelser – då isen drar sig tillbaka leda till en ökad jordskalvsfrekvens. Detta diskuteras i kapitel 11, Tektonik – jordskalvsscenario.

Beberg

Beberg ligger liksom Aberg under istäcket under två perioder i den kommande glaciala/interglaciala cykeln. Under den första av dessa perioder (50 000–72 000 år) liknar utvecklingen den som sker vid Aberg i perioden 95 000–112 000 år. Under den andra av perioderna är Beberg istäckt en längre tid, mellan 85 000 och 114 000 år. Då området befinner sig i smältzonen liknar förhållandena dem som beskrivs ovan. Under perioden ligger Beberg även i isdelarzonen i cirka 8 000 år. I detta skede ökar effektivspänningarna. Den maximala istjockleken kan vara strax under 3 000 meter. Det innebär att även de totala spänningarna blir högre vid Beberg än vid Aberg. Då isen drar sig tillbaka om cirka 114 000 år är de kvarstående horisontella spänningsökningarna större. Krafterna som verkar för att vidga flackt orienterade sprickor ökar, om så sker ger det utrymme för större grundvattenflöden.

Ceberg

Ceberg ligger under isen vid tre tillfällen under den glaciala/interglaciala cykeln. Vid de första av tillfällena (24 000–26 000 år) liknar situationen den som uppstår vid Aberg om 64 000 år. Vid det andra tillfället (44 000–74 000 år) liknar förhållandena dem vid Beberg perioden 85 000–114 000 år. Under den tredje perioden Ceberg är istäckt (80 000–116 000 år) nås cykelns maximala isutbredning. Istjockleken vid Ceberg är då över 3 000 meter. Marken är frusen och både effektiv- och totalspänningarna är höga. Då isen lämnar området, om cirka 116 000 år, är horisontalspänningarna stora. Det betyder att flackt orienterade sprickor kan öppnas.

10.9.5 Utvecklingen i närzonen

Förändringarna under en glaciation påverkar spänningstillståndet i berget och därmed även förutsättningarna för sprickrörelser, sprickbildning och konvergens av deponeringshål.

Rörelser längs en spricka som skär ett deponeringshål kan, om de är tillräckligt stora, leda till att kapseln skadas. Stora rörelser kan dock endast ske utefter stora sprickor, dvs sprickor med stor utsträckning i sitt eget plan. Sprickbildning, dvs nybildning av sprickor eller propagering av befintliga sprickor på stort avstånd från förvarets hålrum skulle kunna leda till att sprickor sammansmälter och att sprickor med stor utsträckning som skär kapslar utvecklas. Sådana sprickor är inte önskvärda eftersom de kan medföra stora berg rörelser och vattenflöden vid kapslarna. Om berget kring deponeringshålen deformeras i sin helhet trycks deponeringshålet ihop – konvergerar. När buffertmaterialet trycks ihop ökar dess tryck mot kapseln, tryckökningarna skulle kunna skada kapseln. Även de höga vattentryck som förekommer under en glaciation bidrar till tryckökningen. De maximala hydrostatiska trycken bestäms av istjockleken vid övergången mellan smält- och isdelar-zonen, och av de vattentryck som förekommer i smältzonen. (Gränsen mellan isdelarzon och smältzon går där temperaturen i gränsskiktet is/mark överskrider trycksmältpunkten.)

Omfattningen av sprickrörelser – dvs rörelser längs befintliga sprickor – har beräknats baserat på olika sätt att representera berggrundens egenskaper och samverkan mellan istäcke och berggrund. Både rörelser rakt under istäcket och i randområdena har studerats. För de fall som hittills analyserats har inga sprickrörelser som har varit stora nog att skada kapslar erhållits /Hansson m fl, 1995 i Processrapporten/.

Sprickbildning och/eller propagering av befintliga sprickor kan förekomma om spänningarna och spänningsanisotropin som genereras av islasten är tillräckligt stora. Ökade huvudspänningsskillnader medför att skjubbrott kan förekomma. I de analyser som hittills gjorts har emellertid spänningstillskottet från islasten endast medfört ökad spänningsanisotropi i tunnlarnas och deponeringshålens närhet /Rosengren och Stephansson, 1996; Hansson m fl, 1995 i Processrapporten/. Glaciationer bedöms därför inte kunna leda till nybildning av stora sprickor som skär deponeringshål eller till att befintliga mindre sprickor propagerar och sammansmälter så att sådana sprickor bildas.

Kryprörelser som skulle kunna leda till att deponeringshålet trycks ihop har studerats överslagsmässigt under mycket pessimistiska antaganden om bergets egenskaper och deformation /Processrapporten/. I beräkningarna antogs att de hypotetiskt möjliga kryprörelserna kring deponeringshålen hinner äga rum under den tid glaciationen varar. Spänningstillståndet i berget antogs vara hydrostatiskt, dvs spänningarna är lika i alla riktningar och bestäms av bergmassans egentyngd (cirka 14 MPa) och islasten (cirka

30 MPa). Trycket mot kapseln ökade då till cirka 44 MPa. Om man antar att inga kryp-rörelser sker blir konvergensen av deponeringshålen försumbar, vilket betyder att bentonitbufferten inte komprimeras och därför behåller sitt ursprungliga svälltryck (cirka 7 MPa). Islasten verkar då istället på kapseln genom ett förhöjt porvattentryck som bestäms av det hydrostatiska trycket. Det maximala hydrostatiska trycket uppnås vid övergången mellan smält- och isdelarzonerna. Den maximala tryckökningen har här uppskattats till cirka 25 MPa, det hydrostatiska trycket på förvarsdjup blir då cirka 32 MPa. Således blir trycket mot kapseln i detta fall totalt cirka 39 MPa.

Kapselinsatsen i BWR-utformningen har beräknats klara ett yttre jämnt fördelat tryck på 80 MPa, medan den i PWR-utformningen motstår 110 MPa, se avsnitt 8.8.2. Det innebär att kapseln bör klara de tryckökningar som kan uppstå under en glaciation. Beräkningarna av kapselns hållfasthet behöver förfinas med mer realistiska inhomogena materialegenskaper enligt avsnitt 8.9.2.

10.9.6 Slutsatser

Under en glacial/interglacial cykel kommer spänningstillståndet i berget att förändras vilket påverkar både seismiska och aseismiska rörelser i berggrunden. Utvecklingens inverkan på spänningstillstånd och berggrörelser är inte fullt utredda. Belastningssituationen är komplex; såväl istjocklek, vattentryck, jordskorpan nedpressning eller nedböjning och storskaliga tektoniska rörelser som bergmassans och sprickornas egenskaper påverkar spänningstillståndet. De beräkningar som refererats ovan omfattar flera olika sätt att representera samverkan mellan berggrund och istäcke. Baserat på beräkningsresultaten antas att förändringarna inte kommer att medföra berggrörelser som leder till att kapslar skadas så att otätheter uppstår. Kapslarna förväntas också motstå förekommande hydrostatiska tryck, men kapselberäkningarna behöver förfinas. Förhållandena för grundvattenflöden kommer att förändras då sprickor trycks ihop eller vidgas. Kopplingen mellan hydrauliska och mekaniska förhållanden vid glaciation är inte fullt utredda.

10.10 Kemisk utveckling

Den kemiska utvecklingen är kopplad till den termiska och den hydrauliska. I basscenariot beskrivs den kemiska utvecklingen i förvaret under antagande att dagens klimatsituation förblir oförändrad och att landhöjningen fortsätter. Det betyder att variationerna inom det tempererade/boreala tillståndets interglaciala regim redan har belysts. Den termiska utvecklingen påverkar den kemiska då temperaturer under fryspunkten förekommer, i övrigt har temperaturvariationerna inom en glacial/interglacial cykel försumbar betydelse för den kemiska utvecklingen. Den hydrauliska och den kemiska utvecklingen är starkt kopplade, de förväntade förändringarna av grundvattenbildning och grundvattenflöden kommer att påverka grundvattnets sammansättning.

10.10.1 Tempererat/borealt tillstånd

Mängden vatten som infiltrerar berggrunden, liksom dess sammansättning, påverkas av förändringar av temperatur och nederbörd samt av kustlinjeförskjutningen. Av dessa bedöms endast kustlinjeförskjutningen ha någon signifikant betydelse för grundvattensammansättningen. Vid kustlinjeförskjutning påverkas grundvattnets salthalt. I områden som ligger över havet infiltrerar sött nederbördsvatten berggrunden. I anslutning till

havet (Östersjön) och under havet kan saltvatten, på grund av dess högre densitet, drivas ner i bergets spricksystem (se avsnitt 10.8.1). Havsvattnets salthalt varierar, dels på grund av att förbindelserna med havet förändras, dels på grund av förändringar av avrinningen inom Östersjöbäckenet. Vid den senaste isavsmältningen anses förbindelserna med havet varit brutna under flera perioder. Under dessa perioder har vattnet varit sött. Även perioder då vattnet varit saltare än i dagens Östersjö antas ha förekommit. Spår av den senaste perioden med vatten saltare än idag har kunnat säkerställas /Andersson, 1998/.

Hur fort och hur mycket salthalten ändras beror på kustlinjeförskjutningens riktning och hastighet, salthalt i det stigande/sjunkande havet, bergets vattengenomsläpplighet och grundvattnets salthalt innan förändringen. Bergets vattengenomsläpplighet förändras då isen rör sig över ett område. Då isen just dragit sig tillbaka kan eventuellt en ökad vattenomsättning förekomma, se avsnitt 10.9.3. Det kan medföra ett snabbare utbyte mellan sött och salt vatten. Variationer av grundvattensammansättningen inom det tempererade/boreala tillståndet bedöms täckas in av basscenariots ostörda respektive framtida sammansättningar.

10.10.2 Permafrosttillstånd

De låga temperaturerna betyder att reaktions- och upplösningshastigheter sänks. Samtidigt ökar koldioxidens löslighet vilket i sin tur betyder att lösligheten av kalcit ökar. För de flesta kemiska reaktioner har temperatursänkningen betydelse först då fryspunkten nås. En annan betydelsefull process relaterad till frysning är att lösta ämnen fryses ut och bidrar till salthalten. Eftersom utfrysningen sker uppifrån nedåt och vattenomsättningen därmed upphör kan utfrysning ge ett signifikant bidrag till en ökad salthalt.

Storleken på ökningen av saltkoncentrationen som förorsakats av utfrysning är osäker. Det finns indikationer på utfälld natriumsulfatmineral i undersökningsområden i Finland som antyder att höga salthalter, förorsakade av saltutfrysning, kan ha förekommit. Under nuvarande förhållanden, och efter att permafrosten tinat, går dessa mineral i lösning och kan endast spåras i vattensammansättningen. Vid platsen förekommer sulfatrika vatten på 100–300 meters djup. Tolkningen att det sulfatrika vattnet är en indikation på utfrysning är dock inte entydig, sulfaten kan också vara en effekt av sulfidoxidation. Sulfidoxidation kan ha orsakats av att syrerikt vatten trängts ned i berggrunden, se avsnitt 10.10.3 nedan.

10.10.3 Glacialt tillstånd

Liksom i permafrosttillståndet är temperaturerna låga. Den hydrauliska situationen skiljer sig från permafrosttillståndet. I isdelarزونen där marken är frusen är förhållandena mer eller mindre stagnanta, grundvattentrycket har en hög men konstant nivå. Utfrysning förekommer och salthalten kan förväntas öka. De områden i Sverige som kan hamna inom isdelarزونen har i allmänhet sött grundvatten. Vattnet kan förväntas vara sött på grund av att områdena ligger över högsta kustlinjen och/eller har legat inom smältzonen under en längre period innan de hamnar i isdelarزونen. Ökningen av salthalten på grund av utfrysning kan därför förväntas vara begränsad.

I smältzonen och vid iskanten förekommer lokalt höga vattentryck, se avsnitt 10.8.3. Hydraulisk spjälkning, dvs sprickbildning på grund av höga vattentryck, kan ge ökad permeabilitet, och då isen drar sig tillbaka kan flackt lutande sprickor öppnas, se avsnitt 10.9.3. Syrerikt smältvatten kan infiltrera berggrunden. Beräkningar visar att vid de flöden som kan förväntas kommer bergets redoxbuffrande förmåga att förhindra att syrerikt vatten når förvarsdjup /Guimera m fl, 1999/.

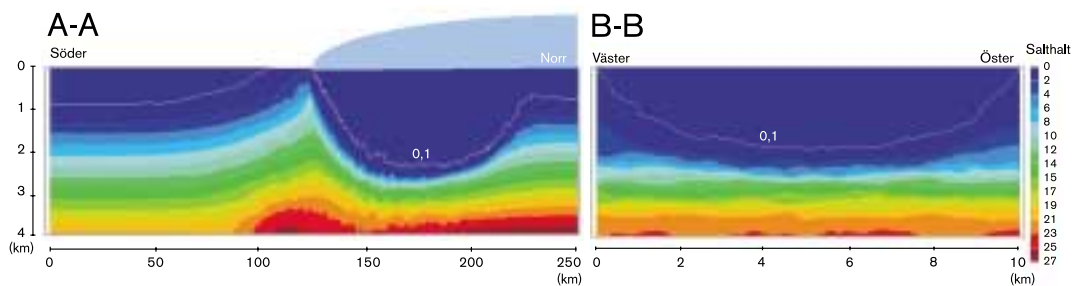
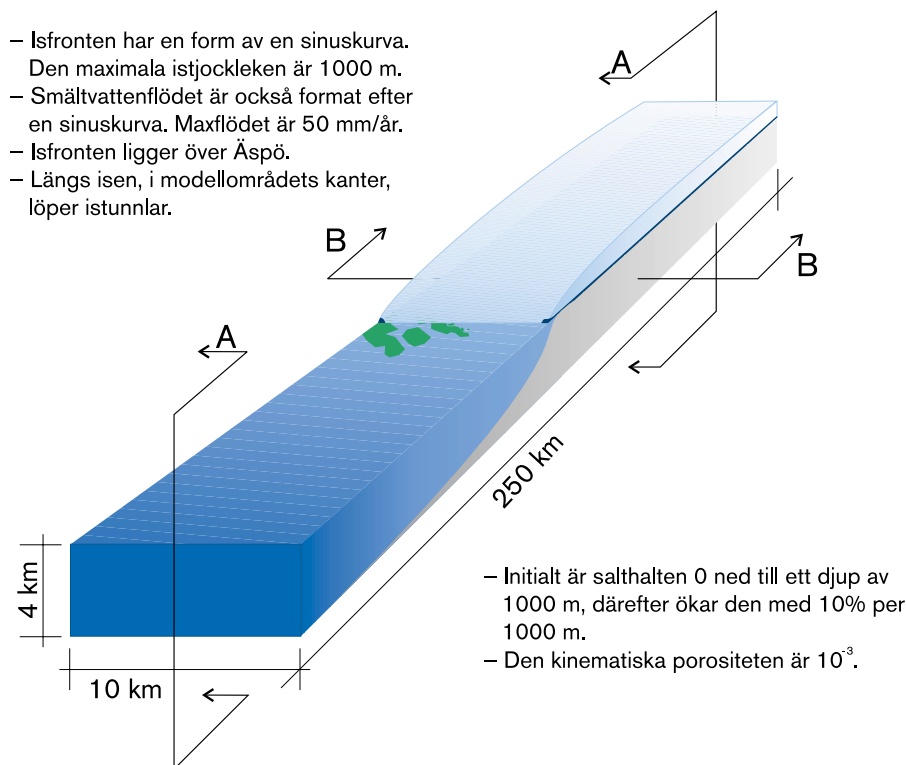
Transporten av syrerikt glacialt smältvatten genom berggrunden har studerats ingående /Guimera m fl, 1999/. Uppgifter om tryck- och flödesförhållanden har hämtats från simuleringar av förhållandena då isfronten ligger rakt över Aberg /Svensson, 1999a/, se även figur 10-21. (I dessa beräkningar har ett funktionellt samband mellan hydraulisk konduktivitet och kinematisk porositet använts, alltså inte det konstanta porositetsvärde som anges i figur 10-21.) Resultaten av Guimeras beräkningar har granskats /Gascoyne, 1999/, och slutsatserna av båda studierna är att berget har kapacitet att förbruka syret innan det når förvarnsnivå. Teoretiskt kan man räkna fram en flödes hastighet som är så snabb att reaktionerna i berget inte hinner förbruka allt syre innan vattnet når förvarnsnivå. Det gäller då den advektiva hastigheten är högre än 10^{-5} m/s. Medianvärdet för advektiva hastigheter i Svenssons beräkningar /1999a/ är $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s, dvs hundra gånger lägre. I zoner med hög vattengenomsläpplighet, då tryckgradienterna är som högst, förekommer dock beräknade advektiva flödes hastigheter som är betydligt högre. I modellen antas att isfronten ligger still över förvaret. I verkligheten rör sig fronten med 10–100 m per år, vilket betyder att områdena med höga tryckgradienter förflyttar sig med tiden. Från de undersökningar som SKB gjort på Aspö, och på andra platser, finns inga geologiska indikationer på att oxiderande vatten förekommit på förvarsdjup. I avsnittet om permafrost ovan nämndes sulfatrikt vatten i finska undersökningsområden som ett eventuellt resultat av att syrerikt vatten förekommit. Det sulfatrika vattnet förekommer på ned till 300 meters djup.

Bergets redoxbuffertkapacitet är alltid tillräcklig för att förbruka allt syre som kan komma att infiltreras. Om man antar att vattenflödet är så lågt att en redoxfront bildas, kommer denna att förflyttas ner till förvaret på 400 000 år, dvs med en hastighet av 1 mm per år /Guimera m fl, 1999/. Detta gäller för flöde endast i sprickor. Om man dessutom tar hänsyn till pyritinnehållet i bergmatrisen blir tiden tio miljoner år.

I smältzonen där höga vattentryck förekommer kan glacialt smältvatten tränga djupt ned i berggrunden, salt vatten från stora djup trängs undan av det söta smältvattnet. Det salta vattnet förs upp mot ytan vid istunnlarna och isfronten, s k upconing. Det sker en utströmning av salt vatten från området under isen, där salthalten minskar. Situationen har modellerats under antagande att isfronten befinner sig mitt över Aberg /Svensson, 1999b/. Den geologiska strukturmodellen grundar sig på Rhén m fl /1997/. Resultat och förutsättningar för modelleringen visas i figur 10-21.

I allmänhet minskar salthalterna inom smältzonen, men i anslutning till iskanten och istunnlarna, där salt vatten från stora djup förs upp mot ytan, ökar de beräknade salthalterna. Ökningen av salthalten blir störst i området framför iskanten mitt emellan istunnlarna. Här har salthalter på 4–6 procent (40–60 g/l) beräknats förekomma på förvarsdjup inom en zon som sträcker sig 5–10 km framför isfronten. I modelleringen antas att isen ligger still. I verkligheten rör sig isfronten med en hastighet av tiotals meter per år då isen växer till, och med hundratals meter per år då den drar sig tillbaka. De höga salthalterna på förvarsdjup förväntas därför endast förekomma under perioder på maximalt något eller några tusen år.

Sött glacialt smältvatten beräknas kunna förekomma på förvarsdjup i stort sett hela tiden området befinner sig i smältzonen. Smältvatten trycks ned i berggrunden i området mitt emellan istunnlarna. Vatten som tidigare fanns i berget förs upp mot ytan i anslutning till iskanten och istunnlarna. Omkring 5–10 km in från iskanten samt cirka 0,5 km från istunnlarna och inom hela smältzonen är den beräknade salthalten på förvarsdjup mindre än 0,1 procent.



Figur 10-21. Förändringar av grundvattnets salthalt då isfronten ligger rakt ovanför förvaret /ur Svensson, 1999/.

Svenssons modell beskriver flödesförhållandena vid Aberg. I modellen ingår en uppdelning mellan salt och sött vatten där initialtillståndet är sötvatten ner till 1 000 meters djup. Därefter ökar salthalten kontinuerligt med 10 procent per 1 000 meter. Denna uppdelning gör det möjligt att använda resultaten kvantitativt för att bedöma effekterna av uppkonung av djupt (salt) grundvatten. Resultaten visar att man kan förvänta sig en salthaltsökning på förvarsdjup vid Aberg på upp till 4–6 procent.

En salthalt på 4–6 procent motsvarar en medelkloridhalt på cirka 25 000 mg/l. För att beräkna sammansättningen hos det salta grundvattnet vid isfronten användes en modell /Laaksoharju m fl, 1999/ som baseras på blandningen av s k referensvatten, se avsnitt 8.9.2. De nutida vattnen som redovisas i basscenariot motsvarar uppmätta data från förvarsdjup och de valda referensvatten (glacialt-, meteoriskt-, biogent- och marint vatten samt brine) /Laaksoharju m fl, 1998/. I fallet med salt vatten vid isfronten har till de uppmätta grundvattenproven andelen brine (saltlake) proportionellt ökats tills man har uppnått en kloridhalt på cirka 25 000 mg/l. På så sätt har det salta vattnets sammansättning uppskattats baserat på de nutida vattnen och dess innehåll av de olika referensvattnen.

För nerträngning av glacialt smältvatten är utvärderingen mer komplicerad. Svenssons beräkningsresultat visar att glacialvatten kan nå ned till 4 000 meters djup, dvs botten av den modellerade bergvolymen. I vissa fall är de beräknade transporttiderna genom berget och upp till iskanten korta, ned mot cirka 20 år. Dessa resultat måste bedömas mot bakgrund av modellförutsättningarna och uppsatta randvillkor. Modellens hydrauliska konduktivitet är högre i de översta 600 meterna än därunder. Detta medför att i stort sett samtliga partiklar passerar de översta 600 meterna berg. Slutsatsen är att man i konduktiva sprickor och sprickzoner kan vänta sig att glacialvatten når ner till 600 meters djup. Det är däremot tveksamt om det glaciala vattnet tar sig in i de sprickor med lägre konduktivitet som står i kontakt med deponeringsvolymen i berget. Sannolikt kommer en del glacialvatten att blandas med befintligt grundvatten i proportioner som beror av konduktiviteten. Ju lägre konduktivitet dess mindre andel glacialvatten.

Glacialt smältvatten har en låg salthalt där de viktigaste jonerna är natrium, kalcium, karbonat och klorid. Halterna ligger under 1mg/l för varje jon /Laaksoharju och Wallin, 1997/. Det glaciala smältvattnet påminner om ytligt grundvatten. Det finns dock en viktig skillnad, ytligt grundvatten har en påtagligt högre halt av kalcium och karbonat än glacialt smältvatten. Anledningen är att infiltrerande nederbördsvatten passerar ett jordlager med organiskt material där biologiska processer avger koldioxid och koldioxiden tas upp av vattnet som blir aggressivt. Under en inlandsis förväntas dessa processer utebli. I berget löser det infiltrerade aggressiva vattnet snabbt kalcit och andra lättvittrade mineral, medan motsvarande reaktioner tar betydligt längre tid för det glaciala smältvatten som tränger ned i berggrunden.

Även om det går långsammare för glacialt smältvatten att lösa mineral påverkas även detta vatten småningom av reaktioner med bergets mineral. I tabell 10-2 nedan har två olika vattensammansättningar valts ut som representativa för vatten som genomgått en liknande utveckling som glacialt smältvatten. Dessa är:

- Grimsel – ett vatten som passerat genom alperna i 500 meter innan det når en tunnel som borrar sig in i berget. Detta vatten har infiltrerat berget högt uppe på alperna utan att påverkas av jordlager och sedan vandrat i alpernas unga granitsprickor och där påverkats av framför allt natrium- och kalciumfältspar.
- Taavinunananen – ett modernt vatten med något tiotals års uppehållstid i berget som kan anses jämförbart med Grimselvatten men under kallare klimatförhållanden.

I tabellen inkluderas också sammansättningen hos glacialt smältvatten som det uppmätts vid utloppet från en glaciär.

Tabell 10-2. Sammansättning hos grundvatten som kan anses representera glacialt smältvatten som infiltrerats under en inlandsis och därefter tryckts ner till förvaringsnivå under en tid av storleksordningen tiotals år. Som jämförelse anges sammansättningen hos ett glacialt smältvatten.

Komponent/ variabel	Grimsel	Taavinunananen	Glacialvatten
pH	9,6	9,1	-
Natrium (Na ⁺ mg/l)	16	4,5	0,17
Kalcium (Ca ²⁺ mg/l)	8	7	0,18
Magnesium (Mg ²⁺ mg/l)	0,2	1,2	0,1
Bikarbonat (HCO ₃ ⁻ mg/l)	35	25	0,12
Klorid (Cl ⁻ mg/l)	5	<1	0,1
Sulfat (SO ₄ ²⁻ mg/l)	11	5	0,5

Tabell 10-3. Vattensammansättningen vid de tre platserna på lång sikt dels i basscenariot, dels i klimatscenariot. Uppgifterna för klimatscenariot avser högsta respektive lägsta salthalt som kan tänkas förekomma.

Komponent/ variabel	Basscenariot			Klimatscenariot	
	Aberg	Beberg	Ceberg	Salt isfront	Söt smältzon
pH	8-9	7-9	8-10	6-8	8-10
Eh (mV)	-250 ± 50	-250 ± 50	-250 ± 50	-200 ± 100	-100 ± 100
Na ⁺ (mg/l)	100-2000	100-1000	50-150	4500	4,5
K ⁺ (mg/l)	2-10	2-10	0-5	37	4
Ca ²⁺ (mg/l)	20-2000	20-1000	10-20	9900	7
Mg ²⁺ (mg/l)	1-40	4-100	1-5	41	1
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	10-20	20-40	10-20	71	25
Cl ⁻ (mg/l)	200-5000	200-5000	100-200	25000	<1
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1-400	1-400	0,1-1	511	5
HS ⁻ (mg/l)	0-1	0-1	0,1-1	0-1	<0,1
Kolloider (mg/l)	< 0,5	<0,5	<0,5	<0,5	2-4
Fulvo- och humussyror (mg/l)	< 0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Grimsel- och Taavinunnanenvattnen är sins emellan snarlika men båda är mycket olika glacialvatten. Reaktionen i berget och blandning är de processer som ligger bakom skillnaden.

I tabell 10-3 jämförs bassceniots långsiktiga sammansättning hos grundvattnet vid Aberg, Beberg och Ceberg och de ovan presenterade sammansättningarna på det salta vattnet vid isfronten samt det söta vattnet inom smältzonen. Det salta vattnet (salt isfront) kan förväntas under en kort tidsperiod då isfronten passerar platsen/platserna. Det söta (sött smältzon) kan förväntas under de perioder ett område befinner sig inom smältzonen. Sammansättningen på det salta respektive söta vattnet styrs i första hand av isens närvaro och kan förväntas vara likartad på de tre förvarsplatserna.

10.10.4 Utvecklingen i geosfären vid de tre förvarsplatserna

Aberg

Abergområdet är idag delvis havstäckt. Höjden över havet varierar mellan -21 meter och 15 meter. Utvecklingen under den inledande perioden med regression beskrivs inom basscenariot. Efter cirka 5 000 år vänds regressionen i transgression. Under perioden 12 000–15 000 år blir området förvandlat till havsbotten. Salt, eller snarare bräckt, vatten (kloridhalt 1 000–5 000 mg/l) rör sig in över området. Tryckgradienterna för grundvattenflöde avtar. Allteftersom transgressionen fortgår kan det salta vattnet på grund av densitetsskillnader infiltrera berggrunden. Östersjön är liksom idag ett innanhav. Salthalten kan vara något högre än idag, främst på grund av minskad avrinning vid övergången till ett kallare klimat.

Hela Abergområdet fortsätter ligga under kustlinjen 110 000 år framåt. Först 125 000 år från idag stiger de högst belägna partierna av Aberg åter upp ur havet. Ett salt vatten förväntas, dess sammansättning täcks in av de variationer som anges inom basscenariot. Den enda förändring som kan påverka vattensammansättningen under denna långa tid är det som sker då isen når området. Det inträffar under två perioder, om 64 000–66 000 år, samt om 95 000–112 000 år. Under den första av perioderna når isfronten området, och iskanten förväntas befinna sig i närheten av Aberg. Isfronten kan befinna sig inom ett

avstånd av cirka 0–10 km från djupförvaret. Under isen trängs salt vatten undan av sött glacialt smältvatten. Salt vatten trycks upp mot ytan vid isfronten och istunnlarna. Vattensammansättningen på förvarsdjup beror på förvarets läge relativt iskant och istunnlar, både sötare och saltare förhållanden än i basscenariot kan tänkas förekomma under denna relativt korta period.

Andra gången isfronten når området är om 95 000 år. Denna gång fortsätter isen att växa och isfronten passerar över och förbi Aberg. Då isen når sin maximala utbredning kan istjockleken vid Aberg vara drygt 2 000 meter. Aberg ligger i smältzonen. Sött glacialvatten tränger undan det bräckta grundvattnet. Mot slutet av perioden kan man räkna med att vattnet på förvarsdjup är sött med en sammansättning liknande den som anges för smältzonen i tabell 10-3. Då isen drar sig tillbaka kan flackt lutande sprickor öppnas och vattengenomsläppligheten öka. Det medför att inträngning av sött smältvatten, undanpressande av salt vatten från större djup samt infiltration av havsvatten kan påskyndas. Östersjön är i detta skede periodvis en sjö med sött vatten, och periodvis ett innanhav med en salthalt högre än i dagens Östersjö. Utvecklingen liknar den som ägde rum vid den senaste isavsmältningen, för cirka 14 000–8 000 år sedan. Aberg befinner sig under ytan på sjön/havet ända till om 125 000 år, då de högsta partierna stiger ur havet. Om cirka 128 000 år liknar förhållandena åter dagens, även om den relativa kustlinjen fortfarande är något högre än idag.

Beberg

Beberg ligger cirka 10 km från kusten, 20–44 meter över havet och längre norrut än Aberg. Det högre läget innebär att perioderna då området ligger över havets yta är fler och längre än vid Aberg. Det nordligare läget innebär att även perioderna då isen når området är fler och längre. Under nästa glaciala cykel, som omfattar 130 000 år, kommer hela Bebergområdet att ligga under kustlinjen i 99 000 år, under denna period är området istäckt i sammanlagt 51 000 år, varav det ligger i isdelarzonen i 8 000 år. Det kan jämföras med Abergområdet som ligger helt under kustlinjen i 110 000 år, varav det ligger i iskant- eller smältzonen i 19 000 år. Hela Bebergområdet ligger över kustlinjen i totalt 17 000 år (0–15 000 år och 128 000–130 000 år). Det inträffar aldrig att Abergområdet i sin helhet ligger över kustlinjen.

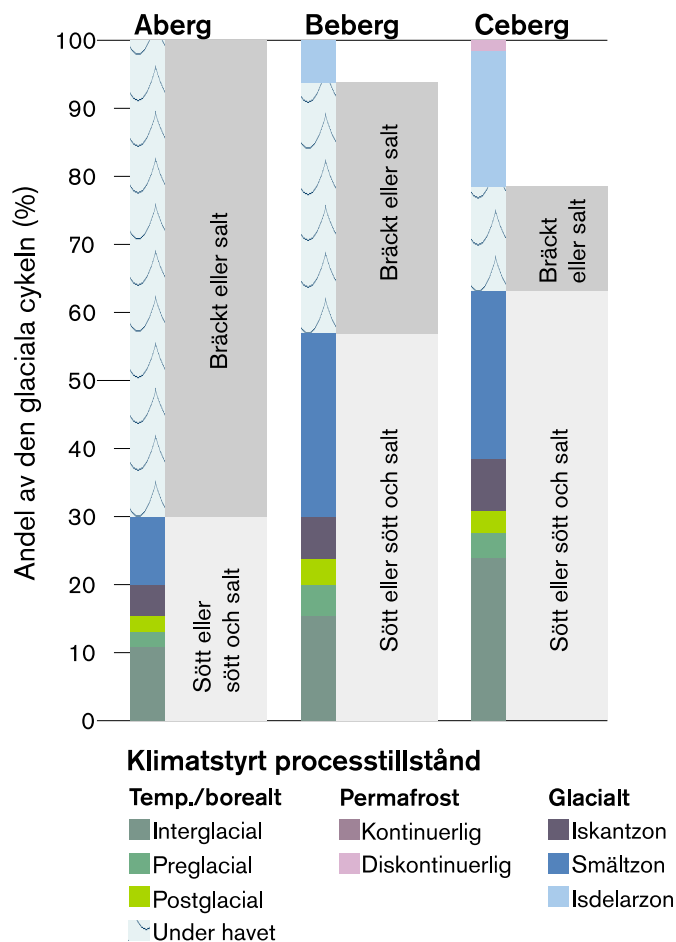
Sött vatten kan infiltrera markytan (berggrunden) då den – helt eller delvis – ligger över havsytan eller då den ligger under isen, dvs då förhållandena är tempererade/boreala eller då området ligger i iskant- eller smältzonen. Under en relativt kort period då isfronten passerar kan salt vatten från stora djup föras upp mot ytan. Ökning av salthalten på grund av nybildning av grundvatten sker då området är havstäckt. Då ett område ligger över havsytan styrs grundvattenflödet av tryckgradienter som följer topografin. Då det ligger under (eller nära) isen styrs grundvattenflödet av isens närvaro. Topografin i Beberg är flack, varför tryckgradienterna för grundvattenflöde kan förväntas öka betydligt då området ligger i iskant- eller smältzonen.

Hela eller delar av Bebergområdet kan således infiltreras av sötvatten under 74 000 av den kommande glaciala/interglaciala cykelns 130 000 år, medan området ligger helt under havet i 48 000 år. Under 8 000 år ligger Beberg i isdelarzonen och ingen grundvattenbildning sker. Det kan jämföras med Abergområdet som är tillgängligt för infiltration av sött vatten under 39 000 år och ligger helt under havet i 91 000 år. Sett över den glaciala/interglaciala cykeln kan vi således förvänta oss ett större inslag av sött vatten vid Beberg än vid Aberg.

Ceberg

Ceberg ligger närmare kusten än Beberg men betydligt högre, 80–130 meter över havet. Ceberg är den nordligaste av försvarsplatserna. Det högre läget innebär att perioderna då området ligger över kustlinjen är fler och längre än vid Aberg och Beberg, det nordliga läget innebär att platsen är istäckt under längre perioder. Av de tre platserna är det bara Ceberg som nås av isen under den glaciala cykelns samtliga kallperioder. Ceberg har den brantaste topografin av de tre platserna, ökningen av tryckgradienterna vid isens närvaro blir därför mindre vid Ceberg. Under den kommande glaciala/interglaciala cykeln (130 000 år), ligger hela området under kustlinjen i 74 000 år, under denna period är det istäckt i 54 000 år. (Totalt är området istäckt under 68 000 av cykelns 130 000 år.)

Hela Cebergområdet ligger över kustlinjen i totalt 30 000 år (0–18 000 år, 39 000–43 000 år, samt 122 000–130 000 år). Under 12 000 isfria år ligger delar av området över kustlinjen (18 000–20 000 år, 35 000–39 000 och 43 000–44 000 år, 78 000–80 000 år, 119 000–122 000 år). Cebergområdet ligger i iskant- eller smältzonen i totalt 42 000 år (24 000–26 000 år, 44 000–60 000 och 68 000–74 000 år, 80 000–93 000 och 111 000–116 000 år). Hela eller delar av Cebergområdet kan således infiltreras av sötvatten under



Figur 10-22. Andel av den kommande glaciala/interglaciala cykeln som de tre försvarsplatserna befinner sig i ett klimattillstånd där det grundvatten som bildas inom området – helt eller delvis – är sött; de perioder områdena i sin helhet ligger under havet och tillfört vatten är bräckt eller salt; samt de perioder områdena ligger i isdelarzonen, eller då permafrost råder, och i stort sett ingen infiltration av vatten från ytan äger rum.

84 000 av den kommande glaciala/interglaciala cykelns 130 000 år, medan området ligger helt under havet i 20 000 år. Under 26 000 år ligger Ceberg i isdelarزونen och ingen grundvattenbildning sker. Abergområdet kan infiltreras av sötvatten under 39 000 år, ligger helt under havet i 91 000 år, och ligger aldrig i isdelarزونen. Motsvarande perioder för Beberg är 74 000 år, 48 000 år och 8 000 år. Sett över den glaciala/interglaciala cykeln kan vi således förvänta oss ett större inslag av sött vatten vid Ceberg än vid både Beberg och Aberg.

I figur 10-22 visas hur stor del av den kommande glaciala/interglaciala cykeln som de tre platserna befinner sig i ett klimattillstånd där allt eller delar av det grundvatten som bildas inom området är sött. I figuren visas också de perioder områdena ligger helt under havet och saltvatten penetrerar berggrunden. Slutligen visas perioderna platserna ligger i isdelarزونen, samt då permafrosttillstånd råder. Under dessa perioder sker i stort sett ingen grundvattenbildning men salthalten kan förväntas öka på grund av utfrysning. Kortare perioder med ökad salthalt förekommer även då isfronten passerar och salt vatten från stort djup förs upp mot ytan.

10.10.5 Utvecklingen i närzonen

De förändringar under en glaciation som kan ha negativ inverkan på den kemiska utvecklingen i närzonen är nedträngning av syrerikt vatten, förekomst av mycket salt vatten samt förekomst av sött vatten med litet innehåll av positiva joner. Följande processer i närzonen påverkas:

- Korrosion av kopparkapseln.
- Jonbyte, svällning och kemisk erosion av bufferten.
- I fall av otäta kapslar:
 - korrosion av gjutjärnsinsatsen,
 - speciering av radionuklider.

I jämförelse med basscenariot förväntas syrerikt vatten på ett större djup då en inlandsis rör sig över ett område. Det syresatta vattnet förekommer i sprickzoner med god vattenledningsförmåga. Det är i allmänhet inte troligt att syresatt vatten når förvarsdjup. I bergarter där gradienterna för grundvattenflöden är höga och den vattenledande förmågan stor, skulle dock syresatt vatten kunna föras ned till stora djup. Det betyder att om syresatt vatten skulle existera på förvarsdjup är förekomsten begränsad, både i tid och rum. Om syresatt vatten mot förmodan skulle nå ett deponeringshål, har bentonitbufferten hög kapacitet att förbruka syre /Guimera m fl, 1999/, och syresatt vatten bör därför aldrig nå kapseln.

Under det tempererade/boreala tillståndet ligger de förväntade salthaltsvariationerna inom de variationer mellan sött och salt vatten som idag återfinns på de tre förvarsplatserna. Då isfronten passerar kan höga salthalter förekomma på förvarsdjup. En högre salthalt ger ett snabbare jonbytesförlopp och därmed en snabbare sänkning av svälltrycket till 4–5 MPa som nås efter fullbordat jonbyte från Na^+ till Ca^{2+} , se basscenariot. Inte ens om de höga salthalter som kortvarigt kan tänkas förekomma då en isfront passerar vore permanenta, äventyras buffertens funktion enligt redovisningen i basscenariot.

De låga salthalter som kan förekomma på förvarsdjup då en plats ligger i smältzonen ligger något under intervallen som redovisas i basscenariot. En lägre salthalt ger ett långsammare jonbyte. Den uppskattade halten av tvåvärda positiva joner är tillräcklig för att förhindra buffererosion, men marginalen är liten.

De förändringar i grundvattensammansättning som kan förväntas relativt basscenariot bedöms inte få någon avgörande påverkan på korrosionen av gjutjärnsinsatsen eller specieringen av radionuklider.

10.10.6 Slutsatser

Under en glacial cykel kommer grundvattensammansättningen att förändras, framför allt salthalten. De variationer av grundvattensammansättningen som kan förväntas inom en glacial/interglacial cykel redovisas i tabell 10-3. De förväntade förändringarna relativt basscenariot bedöms inte hota de tekniska barriärernas integritet.

Liksom i basscenariot dras slutsatsen att de långsiktiga effekterna av kemisk erosion av bufferten under extrema förhållanden eventuellt kan behöva utredas ytterligare. Återfyllningens kemiska utveckling och funktion i klimatscenariot återstår att redovisa.

10.11 Radionuklidtransport

Radionuklidtransport förekommer endast om det finns otäta kapslar i förvaret. Förändringarna under en glaciation förväntas inte leda till att kapslar skadas så att otätheter uppstår. Under en glaciation förändras förutsättningarna för grundvattenflöden och därmed även grundvattensammansättningen. Förändringarna påverkar transporten av radionuklider från förvaret och genom berget, om det finns initialt otäta kapslar. Förhållandena i biosfären förändras radikalt under en glacial/interglacial cykel. Det påverkar i hög grad de doser människan kan komma att utsättas för. Doserna påverkas också av att det använda bränslets nuklidinnehåll förändras, och radioaktiviteten avtar, med tiden. Nedan diskuteras högre och lägre doser, det avser att beskriva hur de klimatrelaterade förändringarna påverkar doserna relativt utvecklingen med en viss (godtycklig) uppsättning kapselskador.

Förändringarna som följer klimatscenariot kan hanteras med samma modeller som används för att beskriva radionuklidtransporten för kapseldefektscenariot (se 9.10). Klimatscenariot kan främst påverka transportprocesserna advektion, sorption och kolloidtransport i berget och sorption i bufferten. De övriga transportprocesserna som diskuteras i kapseldefektscenariot (avsnitt 9.10) påverkas i mindre utsträckning.

Förändringar i grundvattenflödet kommer direkt att påverka advektionen i berget, dels genom att grundvattenflödets storlek ändras, dels genom att sträckningen hos transportbanorna förändras. De resulterande förändringarna i form av ändrade specifika flöden i närområdet och ändrade advektiva transporttider kan beskrivas med modellkedjan, men själva övergångsfasen från ett tillstånd till ett annat beskrivs inte. Teoretiskt skulle radionuklider först kunna ackumuleras, via matrisdiffusion och sorption, längs en transportväg och sedan "tvättas ur" om grundvattenströmningen ändrar riktning. Betydelsen av dessa transienta effekter bedöms dock vara mycket begränsad.

Förändringar i grundvattnets sammansättning påverkar sorptionen. I beräkningar med modellkedjan kan sådana förändringar beskrivas genom att ändra sorptionskoefficienterna (K_d -värdena) i modellerna. Övergången mellan tillstånden beskrivs inte i modellerna, men inte heller här bedöms denna förenkling vara av någon större betydelse för beräkningsresultatet.

Vatten med extremt låg halt av lösta salter kan erodera bentonitbufferten varvid kolloider kan tänkas bildas. Som konstaterats i avsnitt 10.10.5 bedöms detta inte ske i klimat-scenariot. Transport av radionuklider sorberade till kolloider kan därmed försummas även i klimatscenariot.

10.11.1 Tempererat/borealt tillstånd

Radionuklidtransport inom det tempererade/boreala tillståndets interglaciala regim utreds inom bas- och kapseldefektscenariot.

Den klimatrelaterade process inom det tempererade/boreala tillståndet som har störst betydelse för radionuklidtransport är kustlinjeförskjutning. Vid regression ökar tryckgradienterna för grundvattenflöden. Då havsbotten blir land förändras biosfären så att utspädningen av radionuklider minskar. Vid transgression sker det omvända. Grundvattnets salthalt förändras också vid regression/transgression, variationerna bedöms inte ha signifikant betydelse för radionuklidtransporten. Regression medför att doserna ökar på en plats vid kusten, framför allt då biosfären förvandlas från att ha varit hav eller havsvik till våtmark eller skog. Vid transgression sker det omvända vilket medför att doserna minskar.

Inom den preglaciala regimen sker inledningsvis en regression som kan vara snabbare än den interglaciala. I bas- och kapseldefektscenariot dras slutsatsen att omvandlingen av havsbotten till land ger begränsad inverkan på grundvattenflödet på förvarsnivå eftersom kustlinjen redan befinner sig nedströms förvarslägena. Regressionens hastighet påverkar inte denna slutsats. De förväntade variationerna av grundvattnets salthalt ligger också inom ramen för bas- och kapseldefektscenariot. De mest dramatiska förändringarna sker i biosfären. Då havsbotten omvandlas till land förändras förutsättningarna för omsättning av radionuklider i biosfären radikalt. Våtmarker som bildas i det preglaciala skedet kan ha relativt kort livslängd eftersom regressionen bryts av transgression då den växande isen trycker ned jordskorpan.

Vid transgression, när en landyta omvandlas till havsbotten, övergår grundvattenflödena från att ha varit tryckdrivna till att bli densitetsdrivna. Salt vatten tränger undan sött vatten som infiltrerat berggrunden då den befann sig över kustlinjen. Biosfären övergår till marin vilket medför att de doser människor kan komma att utsättas för minskar radikalt.

Vid inledningen av den postglaciala regimen är den relativa kustlinjen mycket högre än idag. En mycket snabb regression sker. Då isen börjar växa till igen, eller då kustlinjen närmar sig den nuvarande avtar regressionens hastighet. Påverkan på grundvattenflöden och biosfär blir desamma som beskrivits ovan för regression inom det preglaciala skedet. Våtmarker som bildas i det postglaciala skedet kommer att ha en betydligt längre livslängd än de som bildas i det preglaciala.

10.11.2 Permafrosttillstånd

Vid permafrosttillstånd minskar vattenomsättningen i berget. Under största delen av året är marken frusen och ingen grundvattenbildning sker. Lokalt kan stora tryckgradienter för grundvattenflöden förekomma. Även om det beaktas bedöms den möjliga transporten av radionuklider till biosfären minska under permafrostförhållanden. Några studier som bekräftar detta är inte genomförda idag.

Under den korta sommaren då det aktiva lagret tinar är vattenomsättningen vid ytan stor. Den stora vattentillgången och erosionen då marken tinar medför att radionuklider som kan ha frusit fast kommer att spädas avsevärt.

Generellt bedöms bergets förmåga att fördröja radionuklidtransport vara lika bra eller bättre än under nuvarande förhållanden. Detsamma gäller utspädningen och spridningen i biosfären. Mer djupgående analyser av permafrosttillståndet behöver dock genomföras för att kvantifiera dessa skillnader.

10.11.3 Glacialt tillstånd

I isdelarzonen är förhållandena mer eller mindre stagnanta, inga grundvattenflöden och därmed ingen radionuklidtransport förekommer.

I smält- och iskantzonen bestäms grundvattenytan av isens topografi, smältvattenflöden och berggrundens vattengenomsläpplighet. Grundvattentrycket motsvaras som mest av istrycket. Där vattentrycket överskrider istrycket bildas istunnlar som ger lokala sänkor av grundvattenytan. Mitt emellan två istunnlar motsvaras tryckgradienterna av isens topografi. In mot istunnlarna kan gradienterna vara betydligt större. Då man närmar sig iskanten ökar gradienterna för grundvattenflöde. I närheten av iskanten, och i anslutning till istunnlarna är vattenomsättningen i berggrunden generellt större än under isfria förhållanden. En bit in från iskanten i området mellan istunnlarna kan grundvattenflödet antingen minska eller öka jämfört med dagens. Om flödet ökar eller minskar beror på smältvattenflödet, platsens läge i relation till istunnlarna samt platsens topografi i relation till isens. Grundvattnet rör sig in mot istunnlarna. Smält- och grundvatten transporteras sedan genom istunnlarna mot iskanten, som kan ligga många hundratals kilometer från förvarsplatsen. I de områden där grundvattenflödena ökar är också vattenomsättningen vid ytan stor. Det innebär att utspädningen och spridningen i biosfären blir stor, och de möjliga doserna låga.

10.11.4 Utvecklingen vid de tre förvarsplatserna

Klimatförhållanden och den hydrauliska utvecklingen vid de tre förvarsplatserna visas i figur 10-19.

Aberg

Förhållandena under den inledande perioden beskrivs inom bas- och kapseldefektscenariot. Efter en tid slutar den relativa kustlinjen att sjunka och börjar istället stiga. Om cirka 10 000 år är den tillbaka på nuvarande nivå, och om cirka 15 000 år ligger hela området under vatten. Förändringarna av de hydrauliska förhållandena under denna period har ingen större betydelse för radionuklidtransporten genom berget. Utspädningen och omsättningen av radionuklider i biosfären kommer att öka och doserna minska då land förvandlas till hav.

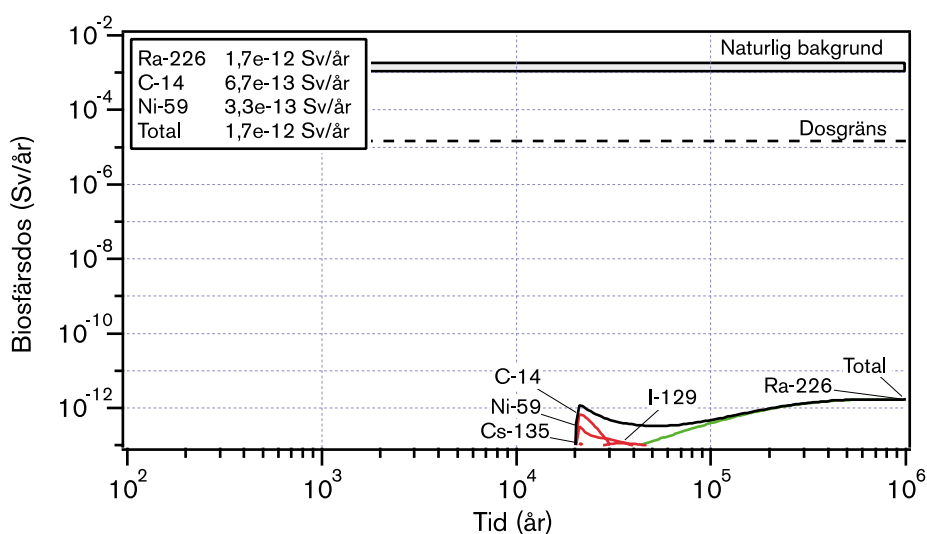
Perioden 15 000–64 000 år ligger Aberg under havets yta. Inledningsvis är grundvattenflödet densitetsdrivet då sött vatten trängs undan av salt. Då det söta vattnet ersatts av salt är förhållandena mer eller mindre stagnanta. Området ligger under havet vilket betyder stor spridning i biosfären. Inga beräkningar av grundvattenflöden har genomförts, man kan dock konstatera att transporten av grundvatten från djupet och upp till ytan kommer att minska relativt dagens förhållanden. Detta, och förändringen av biosfären, medför att dosen till människa minskar.

Perioden 64 000–66 000 år antas isfronten nå Aberg. I figur 10-21 visas hur salthalten varierar i anslutning till iskanten. Samma beräkningsmodell och randvillkor har använts för att beräkna specifika flöden, transporttider och utsläppspunkter för radionuklider /Svensson, 1999a/. Baserat på dessa resultat har ett beräkningsfall för modellkedjan satts upp. Flödet på förvarsdjup har satts till 200 gånger dagens medianflöde. Uppskattningen är baserad på relationerna mellan de maximala flödena i modelleringen ovan och en modellering av dagens regionalflöden /Svensson, 1997/. De höga flödena ger upphov till så små advektiva transporttider att geosfärens förmåga att fördröja radionuklidtransport (se avsnitt 9.10) blir försumbar. Utsläppspunkterna ligger framför allt längs istunnlarna. I området närmast iskanten finns en del utsläppspunkter just framför iskanten. Dessutom antas pessimistiska värden för kapselskada, dvs en stor skada uppstår efter 20 000 år. Resultaten av beräkningsfallet visas i figur 10-23.

Resultaten i figur 10-23 är relevanta för de perioder Aberg ligger i iskantzonen, således 64 000–66 000 år, 95 000–97 000 år och 110 000–112 000 år. Då området ligger i smältzonen (97 000–110 000 år), kan de ses som en övre gräns för radionuklidtransport och doser. Det större flödet på förvarsdjup beräknas ge en ökad uttransport från närzonen relativt dagens förhållanden. De höga flödena och korta transporttiderna medför att den beräknade fördröjningen i fjärrzonen blir försumbar, se figur 10-23. Eftersom utspädningen av radionuklider i biosfären är stor blir de beräknade doserna trots det försumbara och långt under dosgränsen, 0,014 mSv/år.

Då isen lämnar Aberg ligger området långt under havets yta. Den relativa kustlinjen sjunker snabbt, och efter 125 000 år stiger de högst belägna partierna av Aberg upp ur havet. Förhållandena liknar åter dagens.

Sammanfattningsvis kan sägas att under största delen av en glacial/interglacial cykel kommer grundvattenflödena vid Aberg att vara mindre än dagens. Samtidigt kommer utspädningen av radionuklider i biosfären att vara större än idag. Det beror på att området mestadels ligger under havets yta. De relativt korta perioder då isen medför ökade grundvattenflöden, ökar utspädningen i biosfären än mer. Vattenomsättningen i istunnlarna är betydande och då isfronten ligger över Aberg befinner sig området under havets yta.



Figur 10-23. Resultat av radionuklidtransportberäkningar under antagande att isfronten belägger tiden ligger rakt ovanför förvaret vid Aberg.

En grov uppskattning av hur grundvattenflöden och utspädningen av radionuklider i biosfären förändras under den kommande glaciala/interglaciala cykeln har gjorts i figur 10-24. Uppskattningen av grundvattenflödena baseras på Svenssons simuleringar /1997; 1999a; 1999b/. Uppgifter om utspädningen i biosfären är grundade på antaganden om vilket typekosystem som förväntas under respektive epok /Nordlinder m fl, 1999/. Endast förändringarnas storleksordning, 1, 10, 100 osv, relativt dagens förhållanden anges. Ett fiktivt nollvärde har införts för grundvattenflödena, det avser perioder då förhållandena är i stort sett stagnanta. Under dessa perioder sker i stort sett ingen transport av radionuklider till ytan. Dessutom markeras de perioder då området är istäckt. De människor som under dessa perioder skulle kunna exponeras för radionuklider antas befinna sig vid iskanten långt från förvarsplatsen.

Beberg

Förhållandena under den inledande perioden beskrivs inom bas- och kapseldefektscenariot. Utvecklingen den inledande tiden liknar den vid Aberg. Efter cirka 15 000 år når den stigande kustlinjen de lägst belägna delarna av Beberg, och efter 18 000 år ligger hela området under havet. Grundvattenflödena minskar och spridningen i biosfären ökar. Under en period med varmare klimat mellan 38 000 och 43 000 år stiger delar av Bebergområdet till skillnad från Aberg upp ur havet. Grundvattenflödena liknar dagens. Biosfären liknar den i nuvarande kusttrakter. Perioden 43 000–50 000 år ligger Beberg åter under havsytan.

Under kallperioden mellan 40 000–70 000 år når istäcket Beberg tidigare än Aberg. Isen expanderar över platsen, och ligger kvar under en längre period. Då iskanten passerar ligger Beberg under havet. Vid stadialens maximum närmar sig iskanten de baltiska staterna.

Då isen lämnat Beberg fortsätter området att ligga under havsytan tills isen åter närmar sig om 85 000 år. Området ligger i kant- och smältzonen till om 100 000 år. Under perioden 100 000–108 000 år ligger Beberg i isdelarzonen. Inga grundvattenflöden och därmed ingen radionuklidtransport förekommer. Sedan följer åter en period i smältzonen innan iskanten passerar området. Grundvattenflödena är större än idag, men doserna blir små tack vare ökad utspädning i biosfären.

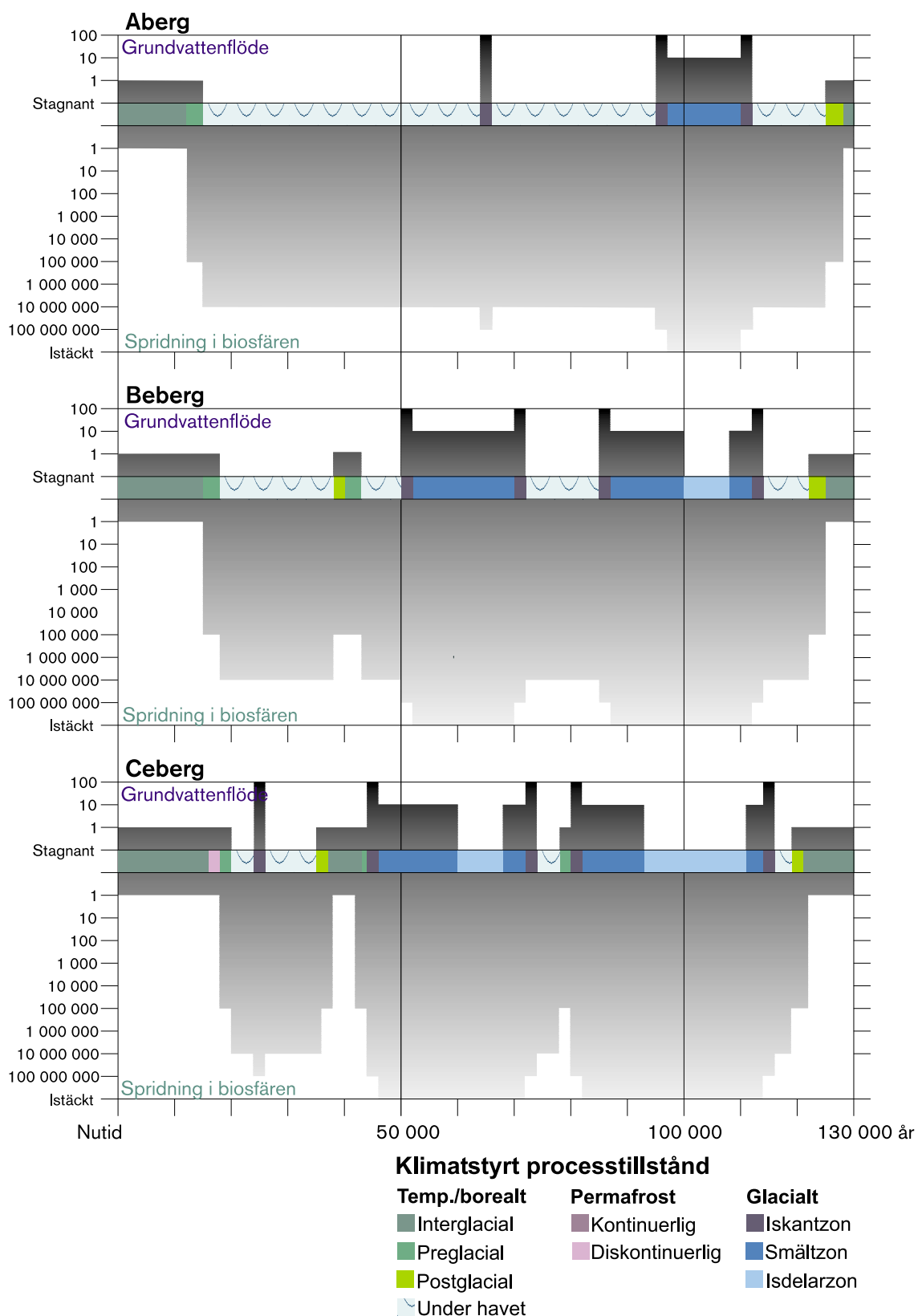
Då isen lämnar Beberg ligger området under havet. Efter 122 000 år stiger de högst belägna partierna av området upp ur havet, och förhållandena liknar alltmer dagens.

Liksom vid Aberg är grundvattenflödena, och därmed radionuklidtransporten mindre än dagens under den största delen av tiden. Då flödena är stora är också spridningen i biosfären stor.

Ceberg

Förhållandena under den inledande perioden beskrivs inom bas- och kapseldefektscenariot. Innan nedtryckningen av berggrunden förvandlar Cebergområdet till havsbotten hinner området uppleva en kort period med diskontinuerlig permafrost. Under denna period antas radionuklidutsläpp och doser bli mindre än under dagens förhållanden.

Ceberg har kontakt med isen under en period mer än Aberg och Beberg, under denna 2 000 år långa period ligger området i iskantzonen, iskanten ligger i havet. Under de två andra stadialerna ligger Ceberg under istäcket längre tid än Aberg och Beberg. En stor del av tiden Ceberg är istäckt ligger området i isdelarzonen.



Figur 10-24. Grovt uppskattade förändringar av grundvattenflöden och spridning i biosfären vid de tre förvarsplatserna. Ökade grundvattenflöden medför större utsläpp av radionuklider från närzonen och sämre förmåga hos berget att hålla kvar och fördröja radionuklider. Vid ökad utspädning i biosfären minskar dosen till människa i motsvarande grad.

Eftersom Ceberg ligger längre från kusten än de båda andra platserna stiger det upp ur havet under interstadialerna. I samband med interstadialen mellan 30 000–40 000 år, mellan 39 000–43 000 år, ligger hela området över havsytan. Förhållandena för radionuklidtransport liknar dem som beskrivs i kapseldefektscenariot. Den därpå följande kallperioden når isfronten Ceberg om 44 000 år. Ceberg ligger då vid kusten, och de högre partierna sticker upp som öar i en skärgård. Grundvattenflödena ökar, liksom spridningen i biosfären. Eftersom området inte ligger helt under havet kan spridningen i biosfären vara mindre än på de övriga platserna, den bedöms dock vara tillräckligt stor för att doserna ska bli lägre än i kapseldefektscenariot.

Då den glaciala perioden brutits av nästa interglaciala period ligger Ceberg under havet. Kustlinjen sjunker snabbt och om cirka 122 000 år ligger området helt ovanför kustlinjen, och förhållandena liknar dagens.

10.11.5 Slutsatser

Under perioder med höga grundvattenflöden ökar den möjliga uttransporten av radionuklider från ett förvar med otäta kapslar. Ökade grundvattenflöden kan förväntas i kustlägen vid regression, men framför allt då ett område ligger i smält- eller iskantzonen. Då grundvattenflödena är som störst är även vattenomsättningen vid ytan stor. Det betyder att utspädningen av radionuklider i biosfären förväntas öka. Sammantaget medför det att doserna minskar relativt dagens förhållanden.

En relativ ökning av doserna förväntas endast vid Aberg då den relativa kustlinjen sjunker jämfört med nuvarande nivå så att havstäckta områden förvandlas till land. Det inträffar bara under interglacialer vid övergången till ett kallare klimat, och således i storleksordningen vart hundra tusende år. De ökade doserna beror framför allt på förändringar i biosfären. Betydelsen av denna förändring utreds i kapseldefektscenariot, där effekterna av landhöjning är inkluderade redan i det rimliga fallet.

10.12 Sammanfattning

Klimatscenariot beskriver en tänkt utveckling under den kommande glaciala/interglaciala cykeln. Det baserar sig dels på modelleringar av utvecklingen under denna period, dels på det utvecklingsmönster som karakteriserat de senaste 400 000–900 000 åren (speciellt Weichselperioden). Den uppmålade utvecklingen kan därför ses både som ett scenario för de kommande 130 000 åren, och som en generell beskrivning av utveckling under en godtycklig glacial/interglacial cykel.

Beskrivningen av de framtida klimatförhållandena utgår från tre klimattillstånd:

- Tempererat/borealt tillstånd.
- Permafrosttillstånd.
- Glacialt tillstånd.

Inom varje tillstånd diskuteras förändringarna i förvarets omgivning, samt hur de kan komma att påverka förvarets utveckling.

I relation till basscenariot medför övergångarna mellan kallare klimat, med permafrost och istillväxt, och varmare klimat, med förhållanden liknande dagens, att:

- Förhållandena i biosfären ändras radikalt.
- Temperaturen i berget påverkas.
- Förutsättningarna för grundvattenflöde förändras – under olika perioder kan grundvattenflödet både minska och öka.
- Förändrade lastförhållanden i berget vid glaciation. Lastförhållandena påverkar sprickornas egenskaper och har därmed återkoppling till förutsättningarna för grundvattenflöde.
- Istäcket medför också en nedtryckning/uppstigning av jordskorpan. I kusttrakter påverkar det förutsättningarna för grundvattenflöde. Nedtryckningen/uppstigningen inverkar också på de storskaliga tektoniska förhållandena.
- Förändrad grundvattensammansättning – framför allt kommer vattnets salthalt att variera.

De mest påtagliga förändringarna relaterade till klimatet sker i biosfären. Under en glacial/interglacial cykel förändras biosfären radikalt i flera sammanhang, t ex då land omvandlas till havsbotten och vice versa, eller då en inlandsis täcker ett område. Lasten från en inlandsis påverkar den mekaniska utvecklingen. Sammansättningen på det vatten som förs ned i berget, randvillkoren för grundvattenflödet genom berget, och därmed grundvattensammansättningen kommer att förändras under en glacial/interglacial cykel. De förändringar som förväntas bedöms inte äventyra de tekniska barriärernas integritet. Klimatrelaterade förändringar bedöms t ex inte kunna leda till att kapslar påverkas så att otätheter uppstår.

Förvarets förmåga att fördröja radionuklidtransport kommer att förändras under en glacial/interglacial cykel. Samtidigt förändras förhållandena för spädning av radionuklider i biosfären. På de tre förvarsplatserna kommer situationen att vara mer gynnsam än idag under största delen av en glacial/interglacial cykel, framför allt på grund av en ökad spädning i biosfären. De största förändringarna sker då isen rör sig över ett område. I det fall otäta kapslar finns förväntas förvarets förmåga att fördröja radionuklidtransport att försämrans under delar av de perioder då området är istäckt. Under dessa perioder förväntas också en stor omsättning i biosfären. Det är naturligt eftersom en ökad vattenomsättning i berget förutsätter stor omsättning även på ytan.

Sammanfattningsvis kan sägas att de förändringar som förväntas under en glaciation inte kommer att hota de tekniska barriärernas integritet. I fall av otäta kapslar är perioder med försämrad förmåga hos förvaret att fördröja radionuklidtransport förenade med en radikalt ökad spädning i biosfären, varför de beräknade doserna till människa minskar. Man bör dock beakta att radionuklidtransport från förvaret har diskuterats för varje klimattillstånd för sig. Vid en snabb ökning av grundvattenflödena kan radionuklider som ackumulerats i berg och/eller biosfär frigöras och ge upphov till en temporär ökning av de möjliga doserna.

10.12.1 Kommande arbete

Genomgången av utvecklingen under en glacial/interglacial cykel visar att klimatrelaterade förändringar inte bör påverka förvarets säkerhet. Flera områden behöver dock studeras närmare, det gäller:

- Möjliga variationer av det skandinaviska klimatet – i syfte att förbättra biosfärsbeskrivningarna, samt som underlag för studier av permafrost- och isutveckling.
- Utveckling av permafrost i Skandinavien, samt de hydrologiska förhållandena vid permafrost.
- Sambandet mellan islast och påkänningar/rörelser i berggrunden. Både kopplingen mellan hydraulisk och mekanisk utveckling, och de storskaliga tektoniska förändringarna.
- Blandning av vatten med olika ursprung i bergets system av sprickor och porer.
- Kapselns hållfasthet, där beräkningar behöver förfinas med användning av mer realistiska materialegenskaper.
- Buffererosion vid extremt jonfattiga grundvattensammansättningar.
- Återfyllningens utveckling och funktion vid klimatförändringar.

Det är också viktigt att följa forskningen om jordens klimatsystem och orsakerna till klimatförändringar.

10.13 Referenser

Ahlbom K, Äikäs T, Ericsson L O, 1991. SKB/TVO ice age scenario. SKB TR 91-32. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson C, 1998. Compilation of information on the climate and evaluation of the hydrochemical and isotopic composition during Late Pleistocene and Holocene. SKB R-98-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Berger A, 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics*, Vol 26, No 4, 624–657.

Berger A, Loutre M F, 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, Vol 10, 297–317.

Berger A, Loutre M F, Gallee H, 1996. Sensitivity of the LLN 2-D climate model to the astronomical and CO₂ 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 CO₂ and Insolation *Ambio* Vol 26, No 1, 32–37.

Bogren J, Gustavsson T, Loman G, 1998. Klimatförändringar – Naturliga och antropogena orsaker. Studentlitteratur, Art.nr 6452, ISBN 91-44-00320.

- Boulton G S, 1990.** Sedimentary and sea level changes during glacial cycles and their control on glaciomarine facies architecture. In: Dowdeswell J A and Scourse J D (eds) 1990. *Glaciomarine Environments: Processes and Sediments*. Geological Society Special Publication No 53, 15–52.
- Boulton G S, Payne A, 1992.** 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, Hulton N, Vautravers M, 1995.** Ice-sheet models as tools for palaeoclimatic analysis: the example of the European ice sheet through the last glacial cycle. *Annals of Glaciology* 21, 103–110.
- Boulton G S, Caban P E, 1995.** Groundwater flow beneath ice sheets. Part II – Its impact on glacier tectonic structures and moraine formation. *Quaternary Science Reviews*.
- Boulton G S, Hulton N, Wallroth T, 1996.** Impacts of long-term climate change on subsurface conditions: Time sequences, scenarios and boundary conditions for safety assessments. SKB PR U-96-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Boulton G S, Curle F eds, 1997.** Simulation of the effects of long-term climatic change on groundwater flow and the safety of geological disposal sites. Report EUR 17793 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ISBN 92-828-0789-4.
- Boulton G S, Wallroth T, Morén L, Kautsky U, 1999a.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB TR-99-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Boulton G S, Zatsepin S, Maillot B, 1999b.** Analysis of groundwater flow beneath ice sheets. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Delisle G, 1998.** Numerical simulation of permafrost growth and decay. *Journal of Quaternary Science* Vol 13 (4), pp 325–333. ISSN 0267-8179.
- Fredén C (ed), 1994.** National Atlas of Sweden – Geology. Almqvist & Wiksell International, Stockholm. ISBN 91-87760-28-2.
- French H M, 1996.** The periglacial environment. Second edition. Addison Wesley Longman Limited. ISBN 0-582-30536-5.
- Frenzel B, Pesci M, Velichko A A (eds), 1992.** Atlas of palaeoclimates and palaeoenvironments of the northern hemisphere. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Gallée H, van Ypersele J P, Fichet Th, Tricot Ch, Berger A, 1991.** Simulation of the Last Glacial Cycle by a Coupled, Sectorially Averaged Climate-Ice Sheet Model. 1. The Climate Model. *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, NO D7, 13,139–13,161.
- Gallée H, van Ypersele J P, Fichet Th, Tricot Ch, Berger A, 1992.** Simulation of the Last Glacial Cycle by a Coupled, Sectorially Averaged Climate-Ice Sheet Model. 2. Response to Insolation and CO₂ Variations. *Journal of Geophysical Research*, vol 97, NO D14, 15,713–15,740.

- Gascoyne M, 1999.** Long-term maintenance of reducing conditions in a spent nuclear fuel repository: A re-examination of critical factors. SKB R-99-41. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Guimera J, Duro L, Jordana S, Bruno J, 1999.** Effects of ice melting and redox front migration in fractured rocks of low permeability. SKB TR-99-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Hansson H, Stephansson O, Shen B, 1995.** SITE-94. Far-field rock mechanics modelling for nuclear waste disposal. SKI Report 95:40. Statens kärnkraftinspektion.
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J, 1976.** Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, vol 194 (4270), 1121–1132.
- Holmgren K, Karlén W, 1998.** Late Quarternary changes in climate. SKB TR-98-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Imbrie J, Imbrie J Z, 1980.** Modelling the Climatic Response to Orbital Variations. *Science*, Vol 207, 943–953.
- Israelsson J, Rosengren L, Stephansson O, 1992.** Sensitivity study of rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden. SKB TR 92-34. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kukla G, Berger A, Lotti R, Brown J P, 1981.** Orbital signatures of interglacials. *Nature*, 290(5804), 295–300.
- Laaksoharju M, Wallin B, 1997.** Evolution of the groundwater chemistry at the Äspö Hard Rock Laboratory. Proceedings of the second Äspö International Geochemistry Workshop, June 6–7, 1995. SKB HRL ICR 97-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Gurban I, Andersson C, 1999.** Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. Intera KB, Sollentuna, Sweden.
- Laaksoharju M, Gurban I, Andersson C, 1999.** Indications of the origin and evolution of the groundwater at Palmottu. The EU Palmottu natural analogue project. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Larsson-Leander G, 1977.** *Astronomi och astrofysik. 2:a reviderade upplagan.* Liber Läromedel, ISBN 91-23-71074-8.
- Leijon B, Ljunggren C, 1992.** A rock mechanics study of fracture zone 2 at the Finnsjön site. SKB TR 92-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Liljequist G H, 1975.** Jordens klimat. Generalstabens Litografiska Anstalt.

Lindblom U, 1997. Hydromechanical instability of a crystalline rock mass below a glaciation front.
SKB PR U-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Losjö K, Johansson B, Bringfelt B, Oleskog I, Bergström S, 1998. Groundwater recharge – climatic and vegetation induced variations. Simulations in the Emån and Äspö areas in southern Sweden.
SKB TR-99-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Lundquist J, 1986. Late Weichselian glaciation and deglaciation in Scandinavia.
In: Sibrava V, Bowen D Q and Richmond G M. Quaternary glaciations in the northern hemisphere. Quaternary Science Reviews, 5, 269–293.

Mangerud J, 1991. The Scandinavian ice sheet through the last interglacial/glacial cycle.
In Frenzel B ed Klimatgeschichtliche Probleme der letzten 130,000 Jahre. Stuttgart, Fisher Verlag, 307–330.

Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, Imbrie J, Moore T C, Shackleton N J, 1987. Age dating and orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. Quaternary Research 27, 1–29.

Milankovitch M, 1941 (1969). Kanon der Erdbeststrahlung. R Serbian Acad Spec Publ 132, Sect Math Nat Sci. (Canon of insolation and the ice-age problem. English translation by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem).

Morén L, Pässe T, 1999. Climate and shoreline in Sweden during the Weichsel and the next 150 000 years.
SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Nordlinder S, Bergström U, Mathiasson L, 1999. Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg.
SKB TR-99-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M, 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature 399, 429-436, 1999.

Pässe T, 1996. A mathematical model of the shore level displacement in Fennoscandia.
SKB TR 96-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pässe T, 1997. A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia.
SKB TR 97-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Raab B, Vedin H (eds), 1995. Sveriges Nationalatlas – Klimat, sjöar och vattendrag. Bra Böcker, Höganäs. ISBN 91-87760-31-2.

Rehbinder G, Yakubenko P A, 1998. Displacements and fluxural stresses of a loaded elastic plate on viscous liquid.
SKB PR U-98-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997. Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995.
SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Rosengren L, Stephansson O, 1990.** Distinct element modelling of the rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden.
SKB TR 90-40. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1992.** SKB 91. Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Berggrundens betydelse för säkerheten.
Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, 1993.** Rock stress in the Fennoscandian Shield. In: Hudson J A (ed) Comprehensive Rock Engineering, Vol 3, Rock Testing and Site Characterisation, pp 445–459, Pergamon Press.
- Svensson U, 1999a.** Subglacial groundwater flow at Äspö as governed by basal melting and ice tunnels.
SKB R-99-38. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 1999b.** A numerical simulation of the origin and composition of the groundwater below Äspö.
SKB R-99-39. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 1997.** A regional analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area.
SKB TR 97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Westman P, Gustafsson B, Wastegård S, Omstedt A, Schoning K, 1999.** Salinity change in the Baltic Sea during the last 8500 years: evidence, causes and models.
SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

11 Tektonik – jordskalvsscenario

11.1 Inledning

I jordskalvsscenariot utreds hur jordskalv på de tre förvarsplatserna kan påverka förvarets säkerhet. I centrum för analysen står frågan om jordskalv kan leda till att isoleringen bryts hos någon eller några kapslar. Förutsättningarna för scenariot är desamma som för basscenariot med undantag av att även jordskalv tänks förekomma i omgivningen. I övrigt gäller i likhet med basscenariot i korthet att förvaret tänks byggt enligt specifikationer och dagens förhållanden i omgivningen tänks fortgå.

Redovisningen inleds med en beskrivning av de initial- och randförhållanden som gäller för scenariot. Tonvikten ligger här på den storskaliga tektoniska utvecklingen och dess betydelse för uppkomsten av jordskalv.

Därefter ges en överblick av de processer och beroenden som styr utvecklingen inom förvarssystemet vid ett jordskalv. I fokus står de mekaniska processerna i geosfären, den mekaniska växelverkan mellan geosfär och kapsel via bufferten och hur kapseln reagerar på de mekaniska påfrestningar den utsätts för.

Därefter redovisas mer i detalj hur en kapsel påverkas av rörelser i berget kring deponeringshålet. Avsnittet mynnar ut i ett kriterium för vilka bergrörelser som är acceptabla utan att kapselns isolering äventyras.

Huvuddelen av kapitlet ägnas en redovisning av simuleringar av jordskalv på de tre förvarsplatserna. Simuleringarna är inriktade på att beräkna sannolikheten för att kriteriet för kapselskada överskrids.

Kapitlet avslutas med de slutsatser som idag kan dras om hur jordskalv påverkar säkerheten vid ett djupförvar.

11.2 Initialtillstånd

Förvarets initiala tillstånd antas alltså vara det samma som i basscenariot, se kapitel 8.

11.3 Randförhållanden

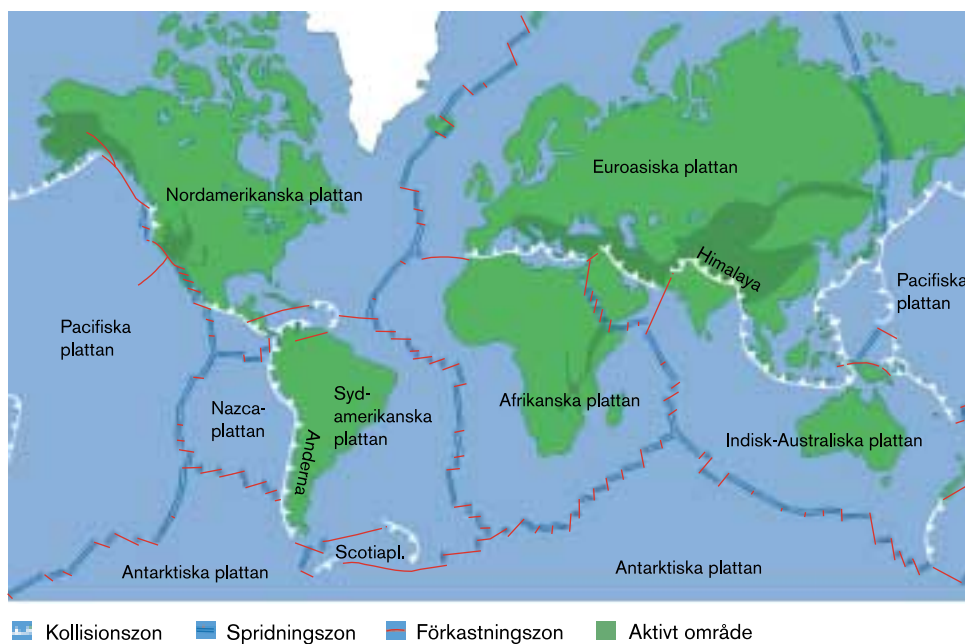
De yttre förhållandena i jordskalvsscenarioet antas vara desamma som i basscenariot med det viktiga undantaget att även seismiska processer inkluderas. I korthet innebär det att:

- Dagens klimatförhållanden antas råda framgent.
- Landhöjning och den inverkan detta har på grundvattenflöden, biosfär etc inkluderas i scenariot.
- Dagens platspecifika biosfärer antas bestå förutom de effekter landhöjningen har på biosfären.
- Bergmekaniska förändringar sker till följd av såväl seismiska som aseismiska processer.
- Inga mänskliga intrång förekommer.

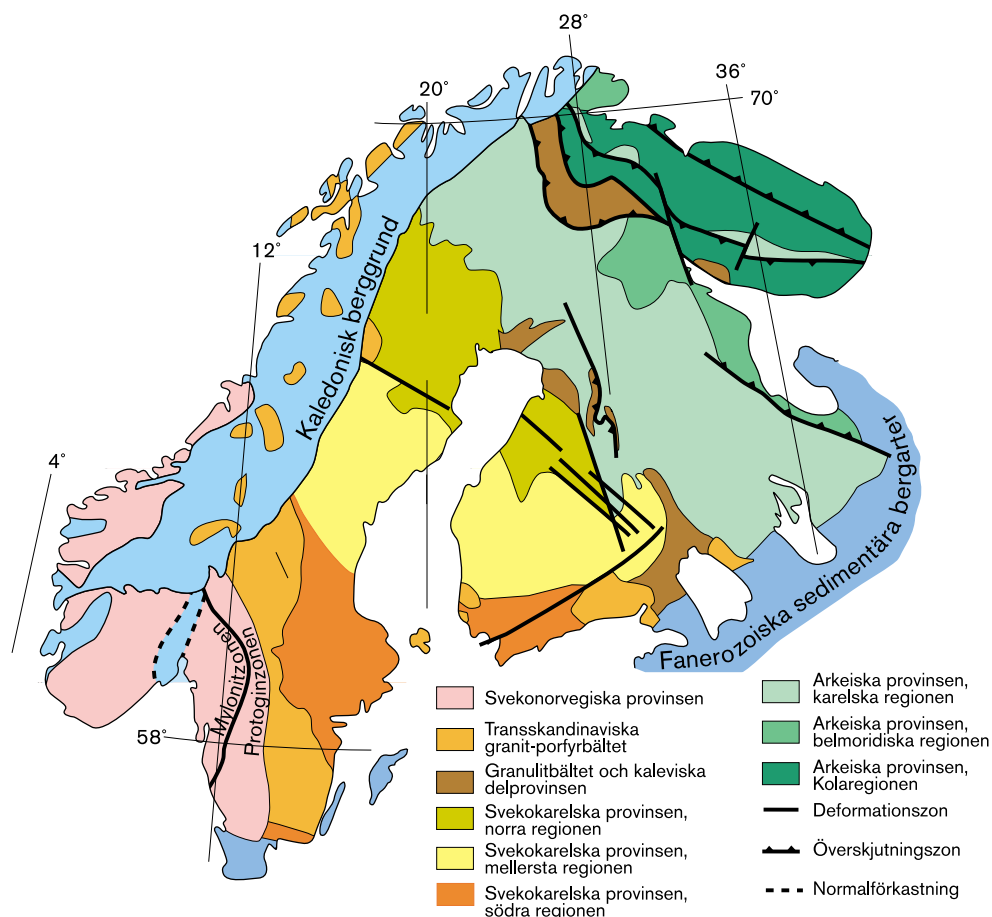
Alla randförhållanden utom de mekaniska beskrivs detaljerat i basscenariot, kapitel 8. I det följande ges en beskrivning av de storskaliga tektoniska förhållandena kring Sverige och vilka förutsättningar dessa ger för uppkomsten av jordskalv.

11.3.1 Inledning

Jordskorpan och den underliggande mantelns yttersta, eller översta, skikt bildar tillsammans den s k litosfären. Jordklotets yta täcks av sex stora och ett antal mindre litosfäriska plattor som på olika sätt rör sig i förhållande till varandra, se figur 11-1. De enskilda plattornas areor kan grovt fördelas på områden med tjock kontinental skorpa och områden med väsentligt tunnare oceanisk skorpa. I gränsen mellan plattor kan ny oceanisk skorpa bildas genom tillförsel av material från manteln (oceanbottenspridning) eller destrueras genom att skorpan (oceanbotten) tvingas ned under randen av en mötande platta. Vid andra plattgränser glider de båda plattorna utefter varandras ränder.



Figur 11-1. Litosfären delas in i ett antal plattor som skiljs åt av olika typer av plattgränser.



Figur 11-2. Olika delar av den Baltiska skölden /från Weibed m fl, 1992/.

Den kontinentala skorpan är uppbyggd av lättare material och kan inte som den oceaniska skorpan försvinna ner under mötande platta. Istället komprimeras, deformeras och veckas sådana delar av den kontinentala skorpan som utgör randområden till kolliderande litosfäriska plattor, vilket leder till bildning av bergskedjor, vulkanisk aktivitet, uppträngning av magma och bergartsomvandling. Dagens kontinenter har bildats och omformats i en följd av sådana s k orogener. Medan den oceaniska skorpan kontinuerligt nybildas och omsätts och därför är relativt ung, är kontinenterna väsentligt äldre. Detta gäller i synnerhet de s k sköldområdena, t ex den Kanadensiska skölden på den Nordamerikanska plattan och de Baltiska och Ukrainska sköldarna på den Euroasiatiska plattan. Sköldarna kan definieras som stora områden av exponerat prekambriskt urberg omgivna av områden som täcks av sedimentära bergarter /Juhlin m fl, 1998/.

Den Baltiska eller Fennoskandiska skölden som utgör en del av kontinentalskorpan på den euroasiatiska litosfäriska plattan, är uppbyggd av ett antal provinser som formats i en följd av tidiga orogener för i huvudsak mellan 1,5 och 3,5 miljarder år sedan /Muir Wood, 1993; Juhlin m fl, 1998/, se figur 11-2. Den sista fasen var den kaledoniska orogesen, som kulminerade för cirka 0,4 miljarder år sedan i samband med att de nordamerikanska och europeiska kontinenterna kolliderade för att sammansmälta och bilda en del av superkontinenten Pangea /Juhlin m fl, 1998/.

11.3.2 Baltiska sköldens mekaniska uppbyggnad

Förenklat kan skölden mekaniskt beskrivas som en cirka 60–80 km tjock platta av elastiskt/sprött material som vilar på ett visköst medium. Skorpan utgörs av de översta cirka 45 kilometrarna, ned till det s k Mohodjupet. I själva verket är hållfasthetsförhållandena i skölden komplicerade. Dels varierar skorpan tjocklek, så att den i centrala Finland är uppemot 60 km och i sydvästra Sverige ner mot 30 km /Muir Wood, 1993; Juhlin m fl, 1998/, dels kan sambandet mellan hållfasthet och djup vara beroende av det geotermiska värmeflödet och av den horisontella töjningshastigheten /Milnes m fl, 1998/. Vid små horisontella töjningshastigheter kan man få en hållfasthetsreduktion i skorpan undre delar och vid stora geotermiska värmeflöden en reduktion av hållfastheten i mantelns övre delar. Hållfasthetsprofilen, eller den reologiska profilen, ser därför annorlunda ut för tvärsnitt genom skölden i norra Sverige med små geotermiska flöden jämfört med sydöstra Sverige där det geotermiska värmeflödet är större /Sundberg, 1995/. Sköldens deformation vid belastning påverkas dessutom av att den korsas av ett antal rörelsezoner som medger att sköldens olika delar kan röra sig i förhållande till varandra, t ex Protogin zonen som utgör gräns för den Sveconorvegiska provinsen i sydväst (figur 11-2).

11.3.3 Sköldens mekaniska tillstånd och utveckling

Den Baltiska skölden utsätts kontinuerligt för en horisontell kompression, ”ridge push”, som beror på oceanbottenspridningen från den midatlantiska ryggen vid den västra tektoniska plattgränsen /Muir Wood, 1993/. Kompressionen är sannolikt en viktig faktor för utveckling av det spänningstillstånd som nu råder i den svenska berggrunden (se Processrapporten) där den största huvudspänningen tenderar att vara horisontell och orienterad i NV-SO, dvs i kompressionsriktningen. Detta gäller i landets södra och mellersta delar, medan bilden är mera splittrad i landets nordligaste delar där en möjlig tendens till N-S orientering av den största huvudspänningen kan observeras /Juhlin m fl, 1998/.

I allmänhet är också den vertikala spänningen en huvudspänning. Till beloppet är den oftast väsentligt mindre än den största horisontella huvudspänningen och kan antas vara bestämd av egentytngden hos det överliggande berget. Detta innebär att spänningstillståndet är deviatoriskt, dvs med riktningberoende spänningar. I berget finns därför inbyggda skjuvspänningar, så att berget kan vara i ett tillstånd av instabil jämvikt, där små spänningsförändringar kan ge upphov till skjuvbrott längs diskontinuiteter med låg hållfasthet. Teorier som går ut på att den mekaniska jämvikten i berggrunden i själva verket är bestämd av en balans mellan bergspänningar och friktionskrafter i stora sprickzoner har föreslagits och innebär att bergmassan kontinuerligt anpassas genom friktionskontrollerade rörelser i de stora sprickzonerna /Scholz, 1990; Leijon, 1993/.

De nuvarande tektoniska förhållandena kan bedömas ha varit konstanta under de senaste två miljoner åren, medan spänningstillståndet i sina huvuddrag kan ha bestått under de senaste 25 årmiljonerna /Muir Wood, 1995/.

Skölden har också utsatts för belastningar på grund av glaciationer och kommer sannolikt att utsättas för nya sådana belastningar /Wallroth, 1997/. Tidsskalan för en glaciationscykel, cirka hundratusen år, är kort jämfört med det tektoniska tidsperspektivet och man kan anta att spänningstillståndet i stort sett återställs mellan nedisningarna /Muir Wood, 1993/. Det finns dock oklarheter ifråga om vilket spänningstillstånd som kommer att gälla under istäcket och vid istäckets rand, och vilken tidsskala som gäller för spänningsfältets återhämtning.

För spänningstillståndet under isen är den enklaste ansatsen att anta att de vertikala spänningarna ökar med ett belopp som är lika med islasten, och att ökningen av de horisontella spänningarna kan beräknas med enkla uttryck ur elasticitetsteorin, vilket ger en spänningsökning som är cirka en tredjedel av vertikalspänningstillskottet. Denna modell innebär att spänningstillståndet blir mindre deviatoriskt och berget därför mer stabilt med mindre benägenhet för skjuvrörelser /Muir Wood, 1993/. Denna modell är den som vanligtvis antas gälla. Andra modeller innebär att horisontalspänningarna kommer att påverkas av islastens utbredning, av skorpan och den översta delen av mantelns böjstyvhet, och av de reologiska egenskaperna hos det viskösa mediet under den elastiska plattan. Sådana modeller ger en komplicerad fördelning av horisontalspänningstillskott i skorpan övre delar /Stephansson, 1987; Rehbinder och Yakubenko, 1998/, med inslag av böjspänningar framförallt i närheten av området kring isranden. Under isen blir effekten på stabiliteten hos berget i skorpan övre del i princip densamma som för den enklare modellen, dvs horisontalspänningstillskottet blir mindre än vertikalspänningstillskottet, vilket resulterar i minskade skjuvspänningar och större stabilitet. Kring isens randområden är bilden oklarare.

Tidsskalan för skorpan nedtryckning under tiden för isens tillväxt, liksom tidsskalan för landhöjningen efter isens avsmältning, beror på de reologiska egenskaperna hos det trögflytande materialet under den elastisk/spröda plattan. Landhöjning efter den senaste istiden pågår fortfarande och dessutom med olika hastighet i olika delar av skölden, vilket innebär att berggrunden fortlöpande deformeras. Av en total vertikal nedpressning av cirka 900 meter i den mest nedpressade delen av skölden beräknas nu cirka 140 meter återstå /Kakkuri, 1986/.

Landhöjningstakten är som mest cirka 90 cm på hundra år /Wallroth, 1997/. De deformationer som sker i samband med den successiva differentiella höjningen ger horisontella töjningar av skorpan i skölden. Beräkningar visar att dessa töjningar kan vara 10^{-9} /år /Muir Wood, 1993/, vilket på hundra år kan ge 1 cm relativrörelse för punkter på 100 km inbördes avstånd.

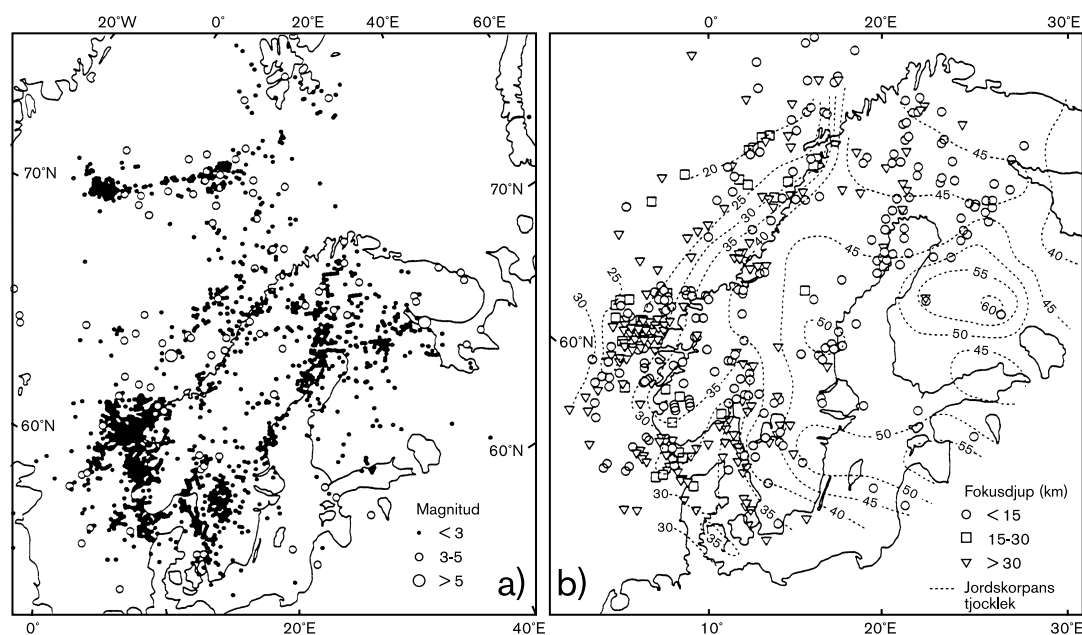
Olika uppfattningar finns om hur stor den kompressiva töjning är som beror på "ridge push". Muir Wood /1995/ argumenterar för att huvuddelen av oceanbottenrörelserna absorberas i sköldens randområden, så att den töjning som överförs till sköldens inre inte är större än 10^{-11} /år, dvs hundra gånger mindre än den som beror på den differentiella landhöjningen. Slunga /1991/ hävdar att minst hundra gånger större töjningar överförs till skölden och att huvuddelen absorberas i form av aseismiska rörelser hos stora rörelse-zoner. Den tydliga skillnaden i seismicitet mellan de provinser som åtskiljs av Protogin-zonen i södra Sverige kan enligt modellen tyda på att denna zon, utan att visa egen seismisk aktivitet, är av betydelse för de tektoniska rörelserna.

De resultat som nu finns från geodetiska mätningar är inte tillräckligt noggranna för att ge en entydig och systematisk bild av de horisontella töjningar som nu pågår i skölden, och visar både på regioner med kompression och regioner med utvidgning. Vilken uppfattning som bäst beskriver verkligheten, dvs om tektoniska rörelser eller den differentiella landhöjningen är den huvudsakliga drivkraften, kan därför förmodligen inte avgöras utan att omfattande och noggranna geodetiska mätningar görs under lång tid. För att bestämma töjningshastigheterna med tillräcklig noggrannhet fordras sannolikt att data från satellitbaserade mätsystem samlas in under en period av minst tio år /Scherneck m fl, 1996/.

De storskaliga rörelser som äger rum i skölden bestämmer randvillkoren för den långsiktiga mekaniska utvecklingen i förvarsberget. Om ingen anpassning genom friktionsrörelser sker får man spänningsförändringar i jordskorpan och förändringar av de laster som verkar på förvarsberget. En töjningshastighet av storleksordningen 10^{-9} /år ger då, högt räknat, en horisontalspänningsförändring av 5 MPa på hundratusen år. Om berggrunden generellt befinner sig i ett tillstånd där spänningarna i berggrunden kontinuerligt balanseras av friktionskrafter i stora sprickzoner kommer inflytandet på lastförhållandena i förvarsberget av storskaliga rörelser i skölden sannolikt att bli mindre. En tredje möjlighet är att den tillförda energin frigörs seismiskt, dvs genom skalv, vilket innebär att förvarsberget kan komma att påverkas av dynamiska effekter.

11.3.4 Jordskalv

Det svenska berggrunden är av gammalt ursprung och visar, liksom andra sköldområden, en seismisk aktivitet som är liten i förhållande till områden där orogenes nu pågår. I den svenska delen av skölden förekommer skalv främst i sydväst i Vänerområdet och längs norrlandskusten, figur 11-3. Skalvens magnitud har bara vid enstaka tillfällen varit större än 4,0 /Slunga, 1991/. Skalven i Kattegatt 1985 och Skövde 1986 var t ex av magnituderna 4,6 respektive 4,5 /Muir Wood, 1993/. Skalv som uppträder i anslutning till något av jordens tektoniskt aktiva områden, t ex Japan, Kaukasus eller Kalifornien kan vara av magnitud cirka 8, vilket innebär att nästan 1 miljon gånger mer energi frigörs än vid ett skalv av magnitud 4.



Figur 11-3. Jordskalv i norra Europa under tiden 1965–1989. Fördelning efter magnitud och djup /från Blundell m fl, 1992/.

Ett jordskalv innebär att töjningsenergi som ackumulerats under ett långsamt deformationsförlopp plötsligt frigörs genom skjuvrörelser längs en större eller mindre diskontinuitet. Den frigjorda energin ges av det seismiska momentet som är produkten av den förskjutna ytans area, beloppet av genomsnittsförskjutningen och bergets elastiska skjuvmodul. Den registrerade jordskalvsmagnituden är i sin tur en logaritmisk funktion av det seismiska momentet. Räknat som seismiskt moment, dvs frigjord energi, innebär ett steg på magnitudskalan en faktor av cirka 30 /Hanks och Kanamori, 1979/. Det följer av ovanstående att skalv av stor magnitud bara kan ske på mycket stora sprickor, dels därför att det seismiska momentet är direkt proportionellt mot den förskjutna ytans area, dels därför att den maximala möjliga genomsnittsförskjutningen inte kan utgöra mer än en bråkdel av sprickans utsträckning i dess eget plan.

Ett skalv kan uppfattas som ett plötsligt lokalt brott vid en ojämnhet som belastas alltmer på grund av aseismisk kryprörelse, dvs stabil tidskontinuerlig rörelse, utefter omgivande jämnare delar av sprickplanet /Slunga, 1991/. Skalvet sker först när spänningskoncentrationen kring den ojämnhet eller de ojämnheter som låser rörelsen blivit tillräcklig för att ge brott. Den förändrade spänningsbilden kring sprickzonen kan innebära att nya spänningskoncentrationer uppstår kring andra ojämnheter, endera i den sprickzon där skalvet skedde eller i någon närbelägen zon. Om inte tillräckligt mycket töjningsenergi frigjorts för att stabiliteten i regionen ska återställas kan då nya brott ske i en sekvens av efterskalv. Ett skalv har dels statiska effekter i form av en permanent deformation och ett förändrat spänningsfält i området kring sprickzonen i vilken skalvet ägde rum, dels dynamiska effekter i form av mekaniska svängningar som kan fortplantas långa sträckor i jordskorpan.

All den mekaniska energi som tillförs skölden behöver inte nödvändigtvis frigöras genom detekterbara skalv. Man kan tänka sig att den seismiskt frigjorda töjningsenergin utgör bara en liten del av den töjningsenergi som kontinuerligt omsätts på grund av deformationer i sköldens olika delar /Slunga, 1991/. Omvänt behöver inte rikliga skalv innebära att motsvarande mängder töjningsenergi kontinuerligt tillförs genom samtidigt pågående storskaliga deformationer. Små deformationer kan vara tillräckliga för att utlösa stora skalv så att också energi som ackumulerats under någon tidigare epok frigörs /Muir Wood, 1993/.

Två olika uppfattningar finns om vilken typ av storskalig deformation som är den huvudsakliga orsaken till den nuvarande seismiska aktiviteten i Skandinavien:

1. Deformationer som beror på tektoniska rörelser, "ridge push".
2. Deformationer som beror på den differentiella landhöjning som fortfarande pågår efter den senaste istiden, "glacial rebound".

Dessutom finns det belägg för att en kraftig seismisk aktivitet ägde rum i Lappland i samband med avsmältning av den senaste inlandsisen, (Lansjärvförkastningen, Parvieförkastningen m fl). Den seismiska aktiviteten i området kan under någon tid ha varit i nivå med den som nu gäller i tektoniskt starkt aktiva områden, t ex dagens Iran /Muir Wood, 1993/. Lansjärvskalvet beräknas t ex ha varit av magnituden 7,8.

Två principiella uppfattningar finns om mekanismen bakom de postglaciala förkastningarna:

1. Tektoniskt genererade spänningar ackumulerades under glaciationen och utlöstes i form av skalv i samband med att vertikalspänningarna reducerades vid avsmältningen. Anledningen till att postglaciala förkastningsrörelser ägde rum i denna del av skölden och inte på andra ställen, beror på att glaciationen här hade en längre och obruten varaktighet och att därför större energimängder kunde ackumuleras.
2. Mot slutet av glaciationen skedde avsmältningen snabbt i området sydöst om den kvarvarande isen, medan avsmältningen gick väsentligt långsammare i nordväst. Detta gav en starkt asymmetrisk avlastning där de två avsmältningsszonerna närmade sig varandra. Under glaciationen låg området dessutom under istäckets nordvästra flank, vilket innebar att spänningsbidraget från de radiellt riktade mantelrörelserna samverkade med de spänningar, orienterade i NV-SO, som tidigare fanns. När den vertikala lasten snabbt minskade utlöstes skalven på grund av de stora skjuvspänningar som då bildades.

Båda uppfattningarna stämmer med riktningen hos förkastningszonerna. Frågan har ägnats mycket uppmärksamhet av det geologiska samfundet, och den förhärskande uppfattningen är att båda mekanismerna har samverkat /Stanfors och Ericsson, 1993/. Det finns också en enighet om att förkastningsrörelserna har skett som reaktivering av befintliga sprickzoner snarare än som nybildning.

11.4 Överblick av processer och beroenden

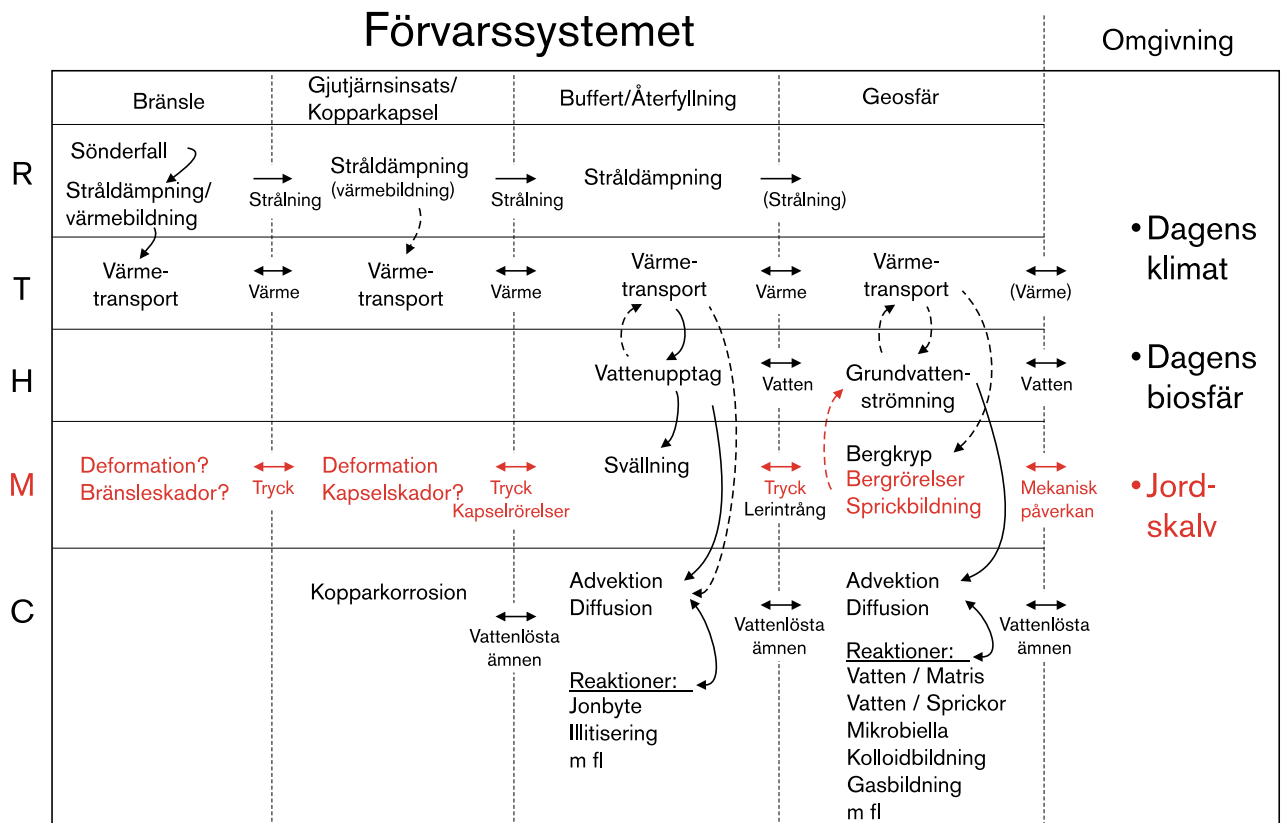
Processerna inom förvarssystemet är desamma som i basscenariot. I tektonikscenariot studeras i första hand geosfärens mekaniska utveckling (processerna bergrörelser och eventuellt sprickbildning) till följd av jordskalv samt de i första hand mekaniska konsekvenser detta får för övriga förvarsdelar se figur 11-4.

De radiologiska, termiska, hydrauliska och kemiska utvecklingarna i tektonikscenariot förväntas väsentligen bli desamma som i basscenariot.

11.4.1 Mekanisk utveckling för kapseln

I basscenariot redogörs för beräkningar av kapselns hållfasthet vid en postulerad förskjutning av 0,1 meter under 30 dagar längs en horisontell spricka som skär deponeringshålet, se avsnitt 8.8.2. Kapseln var av en tidigare och klenare utformning och beräkningarna kan därför i detta avseende betraktas som pessimistiska.

Baserat på beräkningsresultaten används i den följande jordskalvsanalysen pessimistiskt kriteriet att bergrörelser av storleken 0,1 meter och däröver kring ett deponeringshål kan leda till kapselskador.



Figur 11-4. Huvuddragen i processystemet för jordskalvsscenarioet. Röda processer har ett annat förlopp eller annan omfattning jämfört med basscenarioet.

11.5 Mekanisk utveckling i geosfären

De långsamma rörelser som kan äga rum i den svenska berggrunden under de närmaste hundratusen åren, endera på grund av tektoniska rörelser eller på grund av glaciations-effekter, kan innebära långsamma förändringar av lastförhållanden i förvarsberget, eller att berggrunden successivt anpassas genom aseismiska rörelser hos stora sprickzoner så att lastförhållandena i förvarsberget bara förändras i liten utsträckning. Säkerhets-aspekterna på sådana tidskontinuerliga effekter behandlas i basscenarioet.

Den seismiska aktivitet som nu finns i den svenska berggrunden visar att en del av den töjningsenergi som kontinuerligt tillförs eller som har tillförts under någon tidigare epok frigörs genom jordskalv. De risker för förvarets säkerhet som kan uppstå på grund av att mekaniska verkningar av skalv propagerar in i förvarsområdet måste därför analyseras och värderas.

11.5.1 Analys av jordskalvsrisker

Bergmassans mekaniska uppbyggnad, med styvt intakt berg av hög hållfasthet och diskontinuiteter med lägre hållfasthet och lägre styvhet, är sådan att betydelsefulla deformationer i huvudsak sker längs diskontinuiteterna, se Processrapporten. Den ur säkerhetssynpunkt viktigaste mekaniska processen är skjuvrörelser längs sprickor som

skär en eller flera kapselhålspositioner. Det kriterium som tillämpas innebär att skjuförskjutningar överstigande 0,1 meter vid ett kapselhål skulle kunna ge en kapselskada, avsnitt 8.8.3. Detta kriterium gäller oavsett om förskjutningen sker tidskontinuerligt eller momentant, t ex på grund av skalv, och oavsett om den sker i en större eller i flera mindre episoder.

För att uppskatta det antal kapslar som kan skadas på grund av skalv inom de närmaste hundratusen åren vid de tre försvarsplatserna måste man därför kunna beräkna eller uppskatta vid hur många kapselhålspositioner som enstaka eller ackumulerade skjuförskjutningar längs sprickor kan komma att överstiga 0,1 meter under tidsperioden. Sådana beräkningar har gjorts av LaPointe m fl /1999/ för de tre försvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg. För att genomföra analysen måste man:

1. Kunna simulera den mekaniska effekten av enstaka skalv av given magnitud och på givet avstånd från förvaret. En metod för detta har utvecklats av LaPointe m fl /1997/, och sedan förfinats och utvidgats i tillämpningsarbetet /LaPointe m fl, 1999/.
2. Göra prediktion av hur frekvensen av skalv av olika magnitud varierar i tid och rum under de närmaste hundratusen åren. En sådan prediktion har gjorts av LaPointe m fl /1999/. Prediktionen bygger på antagandet att nu tillgänglig magnitud/frekvensstatistik, som bara omfattar små och medelstora skalv, kan extrapoleras dels i tiden, dels till att gälla utanför observationsintervallet, dvs också för stora skalv.
3. Genomföra simuleringar av enstaka skalv enligt den magnitud/frekvensstatistik som gäller i respektive område med de förhållanden vad gäller förekomst av sprickor och sprickzoner som gäller specifikt för de tre försvarsplatserna. Tillräckligt många simuleringar måste genomföras per plats för att statistiskt signifikanta resultat skall erhållas.

Effekt av enskilda skalv

I La Pointe m fl /1997/ visas att de viktigaste parametrarna som styr en sekundär sprickrörelse, t ex vid ett deponeringshål, är skalvets magnitud, avståndet från den sprickzon där skalvet sker till sprickan som skär kapselhålet, samt sprickans storlek, dvs utbredning i sitt eget plan. I ett generiskt exempel visas att sprickrörelser av 0,1 meter kan uppnås om ett skalv av magnitud 7,5 inträffar inom ett avstånd av 100 meter från förvaret. På motsvarande sätt kan sprickrörelser av 0,1 meter uppnås om ett skalv av magnitud 8,2 inträffar inom ett avstånd av cirka 1 km från förvaret. Dessa resultat har även refererats i den senast utförda säkerhetsanalysen i Finland, TILA-99 /Vieno och Nordman, 1999/. Studien bygger på att ett enskilt skalv av given magnitud simuleras som en momentan skjuförskjutning längs ett sprickplan, "primary fracture", i ett halvoändligt elastiskt medium, som därigenom erhåller ett statiskt spänningstillskott. Simuleringen görs med den 3-dimensionella koden POLY3D. För skalv av given magnitud väljs jordskalvsparametrarna, dvs förskjutningsbeloppet och dimensionerna hos den primära sprickan, enligt regressionssamband som funnits gälla globalt mellan registrerade jordskalvmagnituder och dessa parametrar. Man ser också att de använda regressions-sambanden stämmer väl med uttryck som föreslagits för sambandet mellan magnitud och seismiskt moment /Hanks och Kanamori, 1979/.

Det statistiska spänningstillskottet ger ett skjuspänningstillskott och sekundära skjuförskjutningar hos sprickplan i försvarsområdet. Förskjutningens storlek beror på den enskilda sprickans storlek, orientering och avstånd till den primära sprickan. I POLY3D kan sekundära förskjutningar utefter många tusen sprickor beräknas samtidigt, men de olika sprickorna samverkar inte mekaniskt med varandra. För att utvärdera effekterna

i ett förvar fördelar man sprickor i förvarsberget enligt den statistiska spricknätverksmodell (DFN-modell) som gäller för förvarsplatsen och fördelar kapselhålspositioner enligt föreslagen layout. Bara sådana sprickor som skär kapselhålspositioner beaktas. Resultatet av simulering av ett enskilt skalv erhålles som maximala sekundära förskjutningar hos alla sprickor i modellen. Den maximala förskjutningen sker i centrum av sprickan och resultatet räknas om till att avse förskjutningen där sprickan faktiskt skär kapselhålet eller kapselhålen.

Prediktion av jordskalvsfrekvens

Ansatsen är att använda befintlig jordskalvsstatistik och extrapolera denna till att gälla hundratusen år framåt. Statistik över magnitud och frekvens för skalv som inträffat inom fyra områden (södra Sverige, region Vänern, Bottniska viken samt norra Sverige) har använts. Vänerområdet och Bottniska viken är alltså delregioner i Södra och Norra Sverige som utskiljts på grund av speciella seismiska förhållanden, se figur 11-5a. Då denna statistik normeras mot en area med 100 km radie och mot en tidsram av hundratusen år visar det sig att region Vänern har störst antal jordskalv för samtliga magnituder större än 3. Därefter följer södra Sverige, Bottniska viken samt norra Sverige, vilket indikerar att flest stora skalv kan förväntas vid Aberg medan Ceberg får det minsta antalet. Detta kan vara något missvisande då statistiken för södra Sverige domineras av Vänerregionen. Därför har också en korrigerad statistisk fördelning för den östra delen av södra Sverige upprättats. Antalet skalv i sydöstra Sverige är dock så litet att korrektionen, och därmed också extrapolationerna för regionen, blir av begränsat värde.

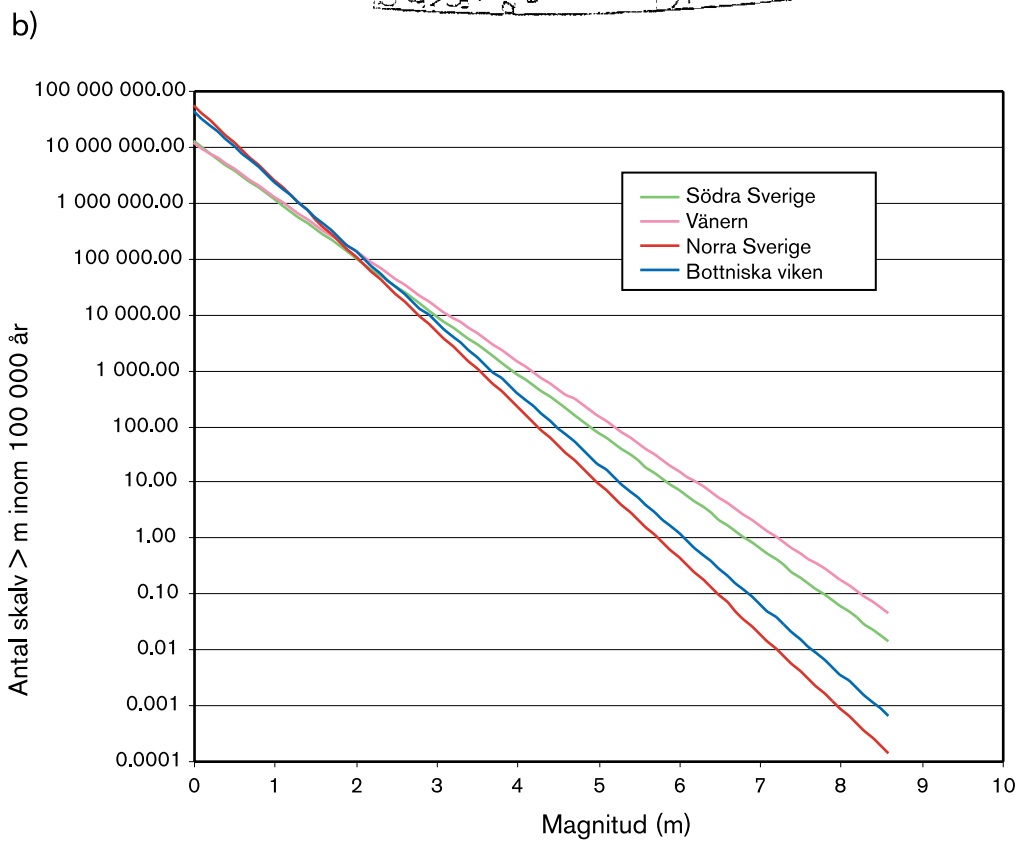
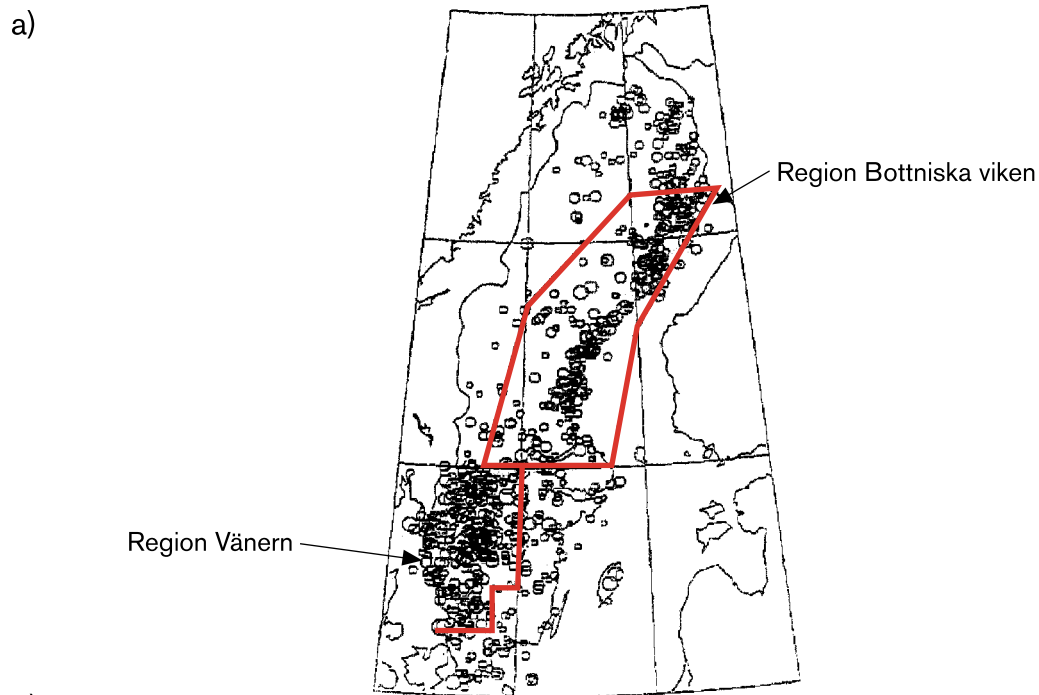
Frekvens/magnitudsamband brukar karakteriseras med två parametrar: a som har att göra med den totala skalvfrekvensen och b som har att göra med fördelningen mellan små och stora skalv så att stora värden på b innebär mindre andel stora skalv. I statistiken över svenska skalv finns bara skalv med magnituder < 5. Både a och b bestäms för de olika områdena genom passning till den befintliga statistiken och extrapoleras till att gälla för skalv med magnituder upp till och med 8,5. Både a och b antas var konstanta. Figur 11-5b visar resultatet. Skalven antas vara Poissonfördelade över tiden.

Tillämpning

För var och en av de tre förvarsplatserna analyseras sprickdata som erhållits vid kartering i olika skalor, och parametrar till stokastiska spricknätverksmodeller bestäms (figur 11-6a). De statistiska parametrarna bestäms genom ett fraktalt angreppssätt, vilket gör att också sprickor på skalor som ofta undertrycks vid kartering inkluderas.

För varje plats genereras hundra realiseringar av den stokastiska delen av spricknätverksmodellen. Realiseringarna kombineras med den layout som föreslagits för respektive plats /Munier m fl, 1997/. Realiseringarna görs med koden FracMan. Ett tillräckligt stort antal slumpvis valda kapselpositioner inkluderas för att ett statistiskt representativt urval av kapselskärande sprickor skall erhållas, se figur 11-6b. Var och en av de hundra realiseringarna representeras vid de följande jordskalvssimuleringarna av dessa urval, som utgörs av mellan 300 och 600 sprickor.

Den jordskalvsstatistik som upprättats för de tre förvarsplatserna används för att slumpvis fördela skalv inom områden med 100 km radie kring platserna (se figur 11-6c). Stora och medelstora skalv slumpas ut på karterade sprickzoner med den enda restriktionen att sprickzonen ska ha en utsträckning i markytan som enligt regressionssambanden är tillräcklig för att hysa skalvet. Små skalv lokaliserar slumpvis utan avseende på karteringsdata. Jordskalvsparametrar (förskjutningsbelopp, djup) väljs sedan stokastiskt inom de intervall som ges av regressionssambanden.



Figur 11-5.

a: Geografisk fördelning av skalv i Sverige.

b: Prediktion av antal skalv inom de närmaste 100 000 åren. Antalen är normerade till en yta motsvarande en cirkel med 100 km radie.

För var och en av de hundra realiseringarna per förvarsplats görs 50 jordskalvs-simuleringar med koden POLY3D med skalvmagnituder enligt gällande frekvens/magnitudstatistik. Resultatet erhålls som statistiska fördelningar av förskjutningar längs kapselskärande sprickor, se figur 11-6d. För att utvärdera inverkan av jordskalvsstatistikens betydelse jämfört med betydelsen av de platsspecifika spricknätverksmodellerna, görs simuleringarna för Ceberg med jordskalvsstatistik från två områden: norra Sverige och Bottniska viken. Bebergssimuleringarna görs med statistik från södra Sverige, Bottniska viken, norra Sverige och med den korrigerade statistiken för den östra delen av södra Sverige. Abergssimuleringarna görs med statistik för södra Sverige och med den korrigerade statistiken. Totalt innebär detta att 40 000 jordskalvssimuleringar görs, var och en inkluderande effekter på mellan 300 och 600 kapselskärande sprickor.

Resultat

Resultaten av analysen uttrycks som den procentandel kapselhål som utsätts för sprickrörelser större än 0,1 meter under hundratusen år. Alla sådana händelser registreras som kapselbrott även om sprickan inte skär genom den del av det åtta meter djupa kapselhålet där den fem meter höga kapseln verkligen befinner sig. I resultatet kan kapselbrott som skett på grund av enstaka skalv och brott som skett på grund av den kumulerade effekten av multipla skalv särskiljas. Eftersom ett stokastiskt angreppssätt används, uttrycks andelarna statistiskt genom sina fördelningar som sedan karakteriseras med medel- och medianvärden.

Analysen visar att Aberg får störst andel kapselbrott (medelvärde 0,65 procent för enskilda och multipla skalv tillsammans, vilket innebär 32 skadade kapslar för ett förvar med totalt 5 000 kapslar) följt av Beberg (0,12–0,15 procent eller 6–7 kapslar, beroende på vilket jordskalvsområde Beberg antas tillhöra) samt Ceberg (0,04 procent eller två kapslar). Anledningen till att Aberg får störst andel kapselbrott är den större andelen stora skalv vid Aberg samt den högre sprickintensiteten med fler subhorisontella sprickor. Siffrorna för Aberg påverkas dock av att jordskalvsstatistiken från Vänerområdet ingått vid slumpningen av skalv. Om man istället använder den korrigerade statistiken kommer medelvärdena för Aberg ner i nivå med Beberg och Ceberg.

Kapselbrottsfördelningarna är starkt asymmetriska. Medianvärdena för samtliga platser är noll procent kapselbrott trots att medelvärdena är av storleksordningen tiondels procent (figur 11-7). Detta framgår också av resultaten i övrigt som visar att i cirka 90 procent av simuleringarna sker inga kapselbrott alls för de flesta kombinationer av platser och jordskalvsstatistik. I övriga tio procent är det oftast enskilda skalv (damaging earthquake) som orsakar brotten; de kumulativa effekterna är således små. Trots att sannolikheten att få enskilda skalv av tillräcklig magnitud och tillräckligt nära förvaret för att orsaka kapselbrott är liten, domineras kapselskadestatistiken av sådana skalv på grund av att de ofta har effekt på flera kapslar. Statistiken visar att en "damaging earthquake" i medeltal ger 90 skadade kapslar för Aberg, 34 för Beberg och 23 för Ceberg.

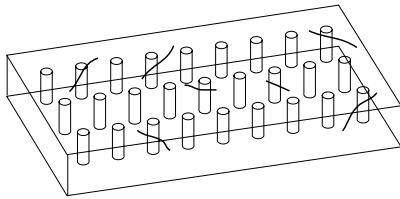
Analysen visar också att "damaging earthquakes" vanligen inträffar inom ett par kilometers avstånd från förvaret. Detta förmedlar en bild snarlik den som redovisades i La Pointe m fl /1997/. Kan förvaret placeras så att sprickzoner stora nog att härbärgera betydande skalv kan undvikas med ett par kilometers marginal är sannolikheten för kapselbrott mycket liten. Sannolikheten för att ett jordskalv stort nog att orsaka kapselbrott ska ske direkt i en spricka som skär kapseln (primary earthquake) är försumbar.

a)



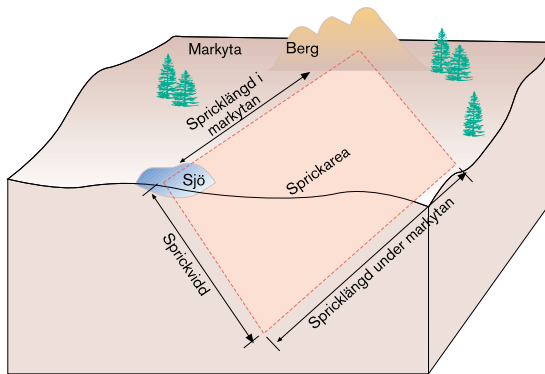
Sprickdata från de tre försvarsplatserna analyseras och används för att upprätta spricknätverksmodeller. Spricknätverksmodellerna har en deterministisk del och en stokastisk del.

b)



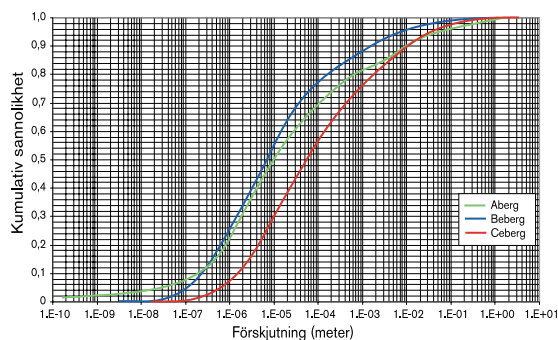
För varje försvarsplats genereras 100 realiseringar av den stokastiska spricknätverksmodellen med hjälp av koden FracMan. För varje realisering behålls ett statistiskt representativt urval av kapselskärande sprickor för den följande jordskalvsanalysen.

c)



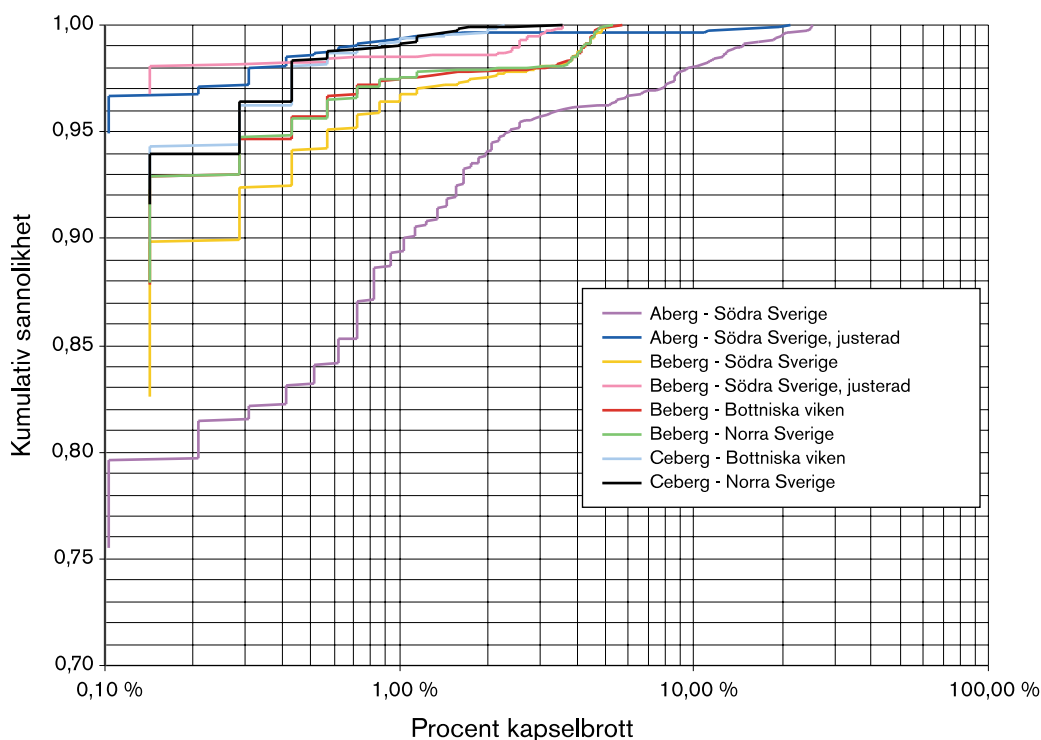
För varje försvarsplats slumpas jordskalv ut på zoner belägna inom 100 km avstånd från försvarsplatsen i enlighet med den jordskalvsstatistik som antas gälla i området. Globala regressions samband används för att avgöra vilken minsta utsträckning i markytan som erfordras för att hysa skalvet. Ett enskilt skalv representeras som en momentan förskjutning. Det maximala förskjutningsbeloppet liksom djupet erhålls stokastiskt från globalt gällande regressions samband.

d)



Skalvens effekt på ett statistiskt representativt urval av kapselskärande sprickor analyseras genom simulering med koden POLY3D.

Figur 11-6. De olika stegen i tillämpningen.



Figur 11-7. Kumulativ sannolikhet för kapselbrott på grund av enstaka eller multipla skalv. Bilden visar att uppemot 90 procent av simuleringarna inte gav några kapselbrott över huvud taget.

11.5.2 Osäkerheter

Osäkerheter som hanteras pessimistiskt

- Sprickornas mekaniska egenskaper.** Sprickorna antas vara utan friktion och kohesion. Detta är pessimistiskt; om sprickorna hade haft en hållfasthet hade alla sekundära förskjutningar blivit mindre. En friktionsvinkel av 30 grader hade reducerat förskjutningsbeloppen med kanske en faktor 5, se Processrapporten. För att tillgodoräkna marginalen måste man förvissa sig om att inte dynamiska effekter medför att sprickytorna är separerade när förskjutningen äger rum. Dynamiska beräkningar med modeller som innehåller en enstaka spricka eller några enstaka sprickor skulle kunna genomföras för att belysa friktionens roll. Om man på ett lämpligt sätt kan visa att friktionen är verksamt vid typiska dynamiska förlopp kan man också tillgodoräkna marginalen, vilket skulle innebära att bara förskjutningar som i den nu gjorda analysen överstiger 0,5 meter skulle överskrida tröskelvärdet 0,1 meter. Innebörden för resultatet är att inga kapselskador alls skulle uppstå.
- Bergmassans mekaniska egenskaper.** Sprickornas sekundärförskjutningar påverkas i de gjorda simuleringarna inte av andra sprickor eller av förvarets hålrum. Berget antas uppföra sig linjärelastiskt. Också detta är pessimistiskt. Om sprickor belägna mellan den primära sprickan där skalvet sker och de sekundära sprickorna i förvaret hade inverkat, t ex genom att deformeras plastiskt, skulle detta innebära att energi skulle förloras på vägen och sekundärförskjutningarna i förvaret hade blivit mindre. Dynamiska beräkningar med modeller som innehåller ett fåtal sprickor skulle kunna genomföras för att belysa hur stor effekt en sådan friktionsdämpning kan innebära.

- **Magnitudförskjutningssamband.** Olika samband gäller för olika typer av förkastningar. Eftersom man inte kan förutsäga om en given zon kommer att reaktiveras som sidoförkastning, överskjutning eller normalförkastning, har en worst case ansats gjorts. Skalv utefter zoner med en utsträckning i markytan av mindre än 40 km har antagits ske som överskjutning, och skalv längs större zoner som sidoförkastning.
- **Kumulativa effekter.** Större delen av kapselskadorna som uppstår på grund av kumulativa effekter av multipla skalv är förmodligen överskattningar, oavsett alla andra antaganden. Den kumulativa effekten erhålls genom att överlagra en följd av statistiskt beräknade förskjutningar. De sekundära sprickförskjutningar som beräknas bör emellertid betraktas som utslag vid en svängningsrörelse, inte som permanenta förskjutningar, även om en statisk beräkningsmetod används för att representera den dynamiska effekten. De verkliga statistiska effekterna av ett skalv är små, eftersom ett skalv inte ökar den statistiska belastningen på sprickorna i omgivningen, utan tvärtom reducerar den belastning som tidigare fanns.
- **Kapselpositioner.** En osäkerhet finns om hur väl man i verkligheten kommer att lyckas undvika att deponera i kapselhål som genomskärs av stora sprickor. I den nu gjorda analysen har inga effekter på sekundärförskjutningarna tillgodoräknats av att kapselpositioner kommer att kunna förkastas.

Övriga osäkerheter

- **Extrapolation av jordskalvsstatistiken.** Den största osäkerheten i riskanalysen gäller sannolikt extrapolationerna av jordskalvsstatistiken, dels därför att befintlig statistik inte omfattar skalv av större magnitud än 5, dels därför att det inte finns något entydigt svar på frågan om orsakerna till tidigare och pågående seismiska aktiviteter eller den möjliga omfattningen och varaktigheten av framtida glaciationer.

Om dagens seismiska aktivitet beror uteslutande på tektoniska krafter (ridge push) kommer töjningsenergi framöver att tillföras berggrunden i samma takt som nu. Också den takt med vilken energi frigörs, aseismiskt eller seismiskt, kommer att vara konstant, men bara tills berggrunden så småningom stabiliseras under ett framtida istäcke. På grund av det mindre deviatoriska spänningstillstånd som då kommer att råda förmår berggrunden ackumulera den töjningsenergi som efterhand tillförs på grund av "ridge push", och den seismiska aktiviteten minskar. Riskanalysen gäller alltså fram till början av nästa glaciation, medan riskerna överskattas under själva glaciationen. Vid avsmältning kommer den ackumulerade energin att kunna frigöras och den seismiska aktiviteten ökar. Om samma fördelning mellan seismiskt och aseismiskt frigjord energi gäller som nu och även samma fördelning mellan små och stora skalv, så innebär detta bara att skalv omfördelas över tiden, så att kapselskadeuppskattningen gäller, räknat som tidsmedelvärde över en fullständig glaciationscykel. Det är emellertid också möjligt att, t ex på grund av den snabba spänningsförändringen vid deglaciationen, proportionerna seismiskt/aseismiskt frigjord energi ändras i riktning mot större andel seismiska rörelser och att fördelningen mellan skalv av olika magnitud förskjuts mot stora skalv. Om detta gäller underskattas antalet skalv i allmänhet och framförallt andelen stora skalv i den gjorda analysen. De postglaciala förkastningsrörelser som dokumenterats i t ex Lansjärv tyder på att detta är fallet, åtminstone i allra nordligaste Sverige. Den kraftiga seismiska aktivitet med stora skalv som har ägt rum i området kan möjligen bero på att nedisningen här varat under så lång tid att exceptionellt stora mängder töjningsenergi kunnat ackumuleras.

Om dagens seismiska aktivitet beror uteslutande på den alltså jämt pågående differentiella landhöjningen och inte på "ridge push" innebär riskanalysen en överskattning eftersom landhöjningstakten nu minskar och kommer att fortsätta minska. Detta gäller dock bara tills efter nästa glaciation. Därefter ökar landhöjningstakten och skalvfrekvensen underskattas. Det går inte att avgöra om den jordskalvsstatistik som använts i riskanalysen generellt innebär en underskattning eller en överskattning, räknat som medelvärde över en glaciationscykel. De stora skalv med magnituder över 8 som ägde rum i nordligaste Sverige i anslutning till den senaste deglaciationen visar emellertid klart att den använda jordskalvsstatistiken underskattar den framtida skalvfrekvensen i nordligaste Sverige om en deglaciation liknande den senaste äger rum inom de närmaste hundratusen åren.

Riskanalysens frekvensantaganden är alltså inte pessimistiska om en glaciation med påföljande deglaciation kommer att infalla inom de närmaste hundratusen åren. Detta gäller oavsett vilken mekanism man antar vara orsaken till dagens seismiska aktivitet. Underskattningen av skalvfrekvensen gäller bara deglaciationsfasen, och möjligen bara det område i nordligaste Sverige där man har funnit tydliga tecken på postglaciala förkastningsrörelser. I området kan uppskattningsvis sju skalv av magnitud 7 eller större ha ägt rum under den senaste glaciationscykeln /Muir Wood, 1993/. I den jordskalvsstatistik som tillämpats för norra Sverige antas att 0,23 sådana skalv förekommer inom de närmaste hundratusen åren, dvs cirka 30 gånger färre. Om man tillämpar faktorn 30 på skalv av alla magnituder skulle det innebära en 30-faldig underskattning av kapselskadorna, förutsatt att förvaret hade lokaliserats till förkastningsområdet. Om nästa glaciation får ett förlopp liknande den föregående ligger dock alla förvarsplatserna med god marginal på tillräckligt avstånd för att underskattningen ska vara väsentligt mindre.

- **Spricknätverksmodeller.** Också när det gäller spricknätverken vid de tre förvarsplatserna finns antagligen en osäkerhet. Man ser till exempel att sprickintensiteten är större i Aberg än i Beberg och Ceberg, vilket endera är en verklig omständighet eller en effekt av det mycket mer omfattande karteringsarbete som gjorts i Aberg. Tolkningen av karteringen och bestämning av DFN-parametrarna har dessutom gjorts i olika sammanhang för Aberg jämfört med Beberg och Ceberg. Skillnaden mellan spricknätverksmodellerna för Aberg och Beberg/Ceberg kan kanske därför uppfattas som ett grovt och pessimistiskt mått på osäkerheten vid upprättandet av DFN-modellerna. I resultaten ser man att det förväntade antalet kapselskador för samma jordskalvsområde kan variera med en faktor mellan 2 och 4 beroende på vilken DFN-modell som används.

11.5.3 Förbättringar av analysen

Det största osäkerheten ligger i prediktionen av frekvensen av framtida skalv. Möjligen kan man genom systematiska och noggranna geodetiska mätningar som genomförs under lång tid få en säkrare beskrivning av de rörelser som orsakar dagens seismiska aktivitet. Därmed kan det också bli möjligt att bättre avgöra vilka roller som "ridge push", differentiell landhöjning och postglaciala förkastningsrörelser har nu och har haft tidigare. Man kan kanske också bättre förstå vilka faktorer som kommer att styra den seismiska aktiviteten under och efter en kommande glaciation. En osäkerhet om en framtida glaciations omfattning och varaktighet kommer ändå att kvarstå, vilket gör att man förmodligen inte på ett avgörande sätt kommer att kunna förbättra prediktionen av framtida skalv. Förbättringar av analysen kan istället bygga på att man beaktar och utnyttjar de marginaler som finns inbyggda i de pessimistiskt hanterade osäkerheterna.

En stor marginal finns inbyggd i antagandet att sprickorna är friktionsfria och utan kohesion. Om man t ex antar att sprickorna har en 30 graders friktionsvinkel kan man uppskatta att förskjutningarna blir väsentligt mindre, kanske en faktor 5, se Processrapporten. Detta innebär att bara sådana skalv som i den nu gjorda friktionsfria analysen ger förskjutningar av storleken 0,5 meter skulle gett förskjutningar överstigande tröskelvärdet 0,1 meter om analysen hade gjorts med antagandet om en 30 graders friktionsvinkel. Bara cirka tio procent av de simuleringar som nu gjorts gav kapselskador, dvs skjuvförskjutningar överstigande 0,1 meter över något eller några kapselhål. Om man istället med samma beräkningsunderlag hade tillämpat kriteriet 0,5 meter, hade man med största sannolikhet inte fått någon kapselskada alls. Detta gäller oavsett skalvfrekvensen: för att få en 0,5 meter förskjutning hade det erfordrats att ett skalv av magnitud 8,2 skett på ett avstånd av mindre än hundra meter från förvaret /LaPointe m fl, 1997/. Ett skalv av denna storlek förutsätter, enligt de regressions samband mellan magnitud och jordskalvparametrar som funnits gälla globalt och som antas gälla också för den seismiska aktiviteten i Sverige, att den primära sprickzonen har en utsträckning i markytan av mer än 100 km /LaPointe m fl, 1999/. Tolkningen av förkastningszonerna i nordligaste Sverige innebär att skalven skett som reaktivering av existerande zoner, och inte som nybildning /Stanfors och Ericsson, 1993/, vilket innebär att om man kan undvika att lägga förvaret inom 100 meters avstånd från en existerande 100 km lång zon, så kommer man också att helt kunna undvika kapselskador på grund av jordskalv.

En möjlig förbättring av analysen vore att genom jämförelse med resultat från dynamiska beräkningar verifiera att effekterna av friktion och kohesion på sekundärförskjutningarna blir av den storleksordning som beskrivs ovan. Effekten, dvs en faktor 5 i reduktion av sekundärförskjutningarna, är baserad på analytiska uttryck (se Processrapporten) som lätt kan verifieras med statistiska beräkningar. Det är idag inte realistiskt att genomföra dynamiska analyser av modeller med ett stort antal sprickor, men verifieringen kan göras principiellt i modeller med ett fåtal sprickor eller med bara en spricka.

Sammanfattningsvis bedöms de pessimistiska antaganden som görs i riskanalysen med god marginal kunna kompensera för de osäkerheter som har att göra med prediktionen av framtida jordskalv och med beskrivningen av spricksystemen på de tre förvarsplatserna. Redan genom att göra mera realistiska antaganden om sprickornas mekaniska egenskaper får man t ex en så kraftig reduktion av rörelserna att antalet skadade kapslar blir noll, förutsatt att förvaret inte läggs på mindre avstånd än 100 meter från zoner med utsträckning av mer än 100 km. Till detta kommer effekten av övriga pessimistiska antaganden och pessimistiskt hanterade osäkerheter, där förmodligen framförallt antagandet om att bergmassan är ett linjärelastiskt medium utan dämpande egenskaper innebär betydande marginaler.

Alla slutsatser gäller under förutsättning att den statistiska representationen av de dynamiska effekterna är adekvat och helst pessimistisk. De fysikaliska processerna kring verkliga skalv är komplicerade och kan t ex omfatta sekvenser av efterskalv. Den använda koden, POLY3D, har verifierats mot analytiska lösningar av statistiska problem /LaPointe m fl, 1997/. Man bör validera resultaten också genom att jämföra med resultat som erhållits vid dynamisk behandling av enkla fall och försöka analysera betydelsen av efterskalvssekvenser.

Slutligen måste man observera att utvärderingen av de gjorda beräkningar bygger på antagandet att en 0,1 meter skjuvrörelse ger en kapselskada. Kriteriet är pessimistiskt och baseras på tidiga beräkningar som gav en måttlig plastisk töjning i kopparkapseln vid denna deformation /Börgesson, 1992/. Relevansen hos kriteriet bör provas genom nya beräkningar med nuvarande kapseldesign.

11.6 Slutsatser för säkerhetsanalysen

Den presenterade analysmetodiken är under utveckling och utgör ett första steg i ett tillvägagångssätt för kvantitativ analys av jordskalvsscenarioer.

Vissa slutsatser för säkerhetsanalysen kan dock dras redan nu. Medianvärdet för risk för kapselskada är noll procent för samtliga kombinationer av platser och jordskalvparametrar. I ungefär 90 procent av samtliga realiseringar för de olika kombinationerna sker inga skador alls. Analysen visar också att de flesta skador uppstår på grund av enskilda skalv. Antalet förväntade sådana skalv under hundratusen år är lägre än 0,35 för samtliga kombinationer av platser och jordskalvparametrar. Dessa observationer ger en övre gräns för sannolikheten för kapselskador.

Ur ett strikt riskperspektiv är det dock medelvärdet (väntevärdet) av risken som är intressant. Här ger analysen att den förväntade risken för kapselskada vid de olika platserna varierar mellan 0,04 procent för Ceberg till 0,65 procent för Aberg. Dessa risker kan jämföras med risken för en initial kapselskada vilken är 0,1 procent. Storleksordningen är densamma för dessa två risktyper.

Metodiken leder till överskattningar av risken och antalet förväntade kapselskador bör i själva verket vara betydligt lägre. Bl a kan effekten av att inkludera friktion i beräkningarna överslagsmässigt uppskattas leda till att inga kapselskador predikteras. Dessutom kräver skalv som orsakar skada primära sprickzoner av sådan utsträckning att de med stor säkerhet kan undvikas vid inplaceringen av ett framtida förvar vilket gör att risken för kapselskador orsakade av jordskalv framstår som försumbar.

Mot denna bakgrund förväntas jordskalv inte leda till kapselskador. Därför görs inga beräkningar av radionuklidtransport i tektonik/jordskalvsscenarioet i SR 97. Metodiken för jordskalvsanalyser vidareutvecklas för kommande säkerhetsanalyser.

11.7 Referenser

Börgesson L, 1992. Interaction between rock, bentonite, buffer and canister. FEM calculations of some mechanical effects on the canister in different disposal concepts. SKB TR 92-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hanks T C, Kanamori H, 1979. A moment-magnitude scale. Journal of Geophysical Research, Vol 84, 2348–2350.

Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998. The very deep hole concept – geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Kakkuri J, 1986. Newest results obtained in studying the Fennoscandian uplift phenomenon. Tectonophysics Vol 130, 327–331.

LaPointe P, Wallman P, Thomas A, Follin S, 1997. A methodology to estimate earthquake effects on fractures intersecting canister holes. SKB TR 97-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.

LaPointe P, Cladohous T, Follin S, 1999. Calculation of displacements on fractures intersecting canisters induced by earthquakes: Aberg, Beberg and Ceberg examples. SKB TR-99-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Leijon B, 1993.** Mechanical properties of fracture zones.
SKB TR 93-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Milnes A G, Gee D G, Lund C-E, 1998.** Crustal structure and regional tectonics of SE Sweden and the Baltic Sea.
SKB TR-98-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Muir Wood R, 1993.** A review of the seismotectonics of Sweden.
SKB TR 93-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Muir Wood R, 1995.** Reconstructing the tectonic history of Fennoscandia from its margins: The past 100 million years.
SKB TR 95-36. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Sandstedt H, Niland L, 1997.** Förslag till principiell utformning av förvar enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg.
SKB R-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rehbinder G, Yakubenko P A, 1998.** Displacement and flexural stresses of a loaded elastic plate on a viscous liquid.
SKB PR U-98-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Scherneck H-G, Johansson J M, Elgerud G, 1996.** Application of space geodetic techniques for the determination of intraplate deformations and movements in relation with the postglacial rebound of Fennoscandia.
SKB TR 96-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Scholz C H, 1990.** The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge.
- Slunga R, 1991.** The Baltic Shield earthquakes. *Tectonophysics*, Vol 189, 323–331.
- Stanfors R, Ericsson L O (eds), 1993.** Post-glacial faulting in the Lansjärv area, Northern Sweden. Comments from the expert group on a field visit at the Molberget post-glacial fault areas.
SKB TR 93-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, 1987.** Modelling of crustal rock mechanics for radioactive waste storage in Fennoscandia – Problem definition.
SKB TR 87-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, 1995.** Termiska egenskaper för kristallint berg i Sverige. Kartor över värmekonduktivitet, värmeflöde och temperatur på 500 m djup.
SKB PR D-95-018. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wallroth T, 1997.** Vad betyder en istid för djupförvaret. En delrapport från projektet ”Beskrivning av risk”.
SKB R-97-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, TILA-99.
Posiva 99-07. Posiva Oy, Finland.

12 Scenarier baserade på mänskliga handlingar

12.1 Inledning

Principiellt kan man tänka sig tre olika sätt att hantera farligt avfall:

- Späda ut det till ofarliga koncentrationer och sprida ut det i miljön.
- Omvandla det till ofarlig form.
- Samla in det och förvara det oåtkomligt från människa och miljö.

För det använda kärnbränslet – liksom för merparten av det radioaktiva avfall som samhället genererar – används den sistnämnda principen. Det använda kärnbränslet ska enligt planerna kapslas in och placeras i ett förvar djupt nere i berggrunden. Det innebär att de radioaktiva ämnena finns samlade på en plats. Om människor sätter förvarets barriärer ur funktion kan de komma att exponeras för stora mängder av det radiotoxiska materialet. Denna potentiella risk är en direkt följd av den valda hanteringsprincipen.

Människan är beroende av, och påverkar, den miljö hon lever i. Mänskliga handlingar påverkar biosfären och därmed spridningsvägar för eventuellt förekommande toxiska ämnen. Mänskliga handlingar, t ex bevattning, dikning, byggande av dammar och kanaler, kan påverka de hydrologiska randvillkoren för ett djupförvar. Genom att borra och bygga i berget, eller anlägga tippor eller genomföra vapenprov på ytan av förvaret, kan de mekaniska förhållandena påverkas. De termiska förhållandena kan påverkas genom utvinning eller lagring av värme i berget.

Listan över mänskliga handlingar som påverkar förhållandena på en förvarsplats kan göras mycket lång. Eftersom samhällets och människans utveckling i princip är oförutsägbara kan den aldrig göras komplett. Säkerhetsanalysen omfattar endast handlingar:

- som påverkar förvarssystemets funktion och säkerhet och som kan medföra radiologiska konsekvenser, och
- som genomförs utan kännedom om förvaret och/eller dess funktion och syfte, dvs handlingar med oavsiktligt uppsåt.

Tanken att enbart beakta oavsiktliga handlingar har diskuterats och förankrats inom OECD/NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency). Man menar att det samhälle som producerar det radioaktiva avfallet också är ansvarigt för att utveckla en metod att ta hand om det. Vid utvecklingen av metoden ska hänsyn tas till kommande generationer så långt möjligt. Emellertid kan nuvarande samhälle inte skydda kommande generationer från deras egna handlingar, om de som genomför handlingen är medvetna om dess konsekvenser /OECD NEA, 1995/.

12.2 Metod

Människors handlingar kan komma att påverka förvaret på olika sätt. Flera faktorer av olika karaktär t ex bebyggelse mönster, samhällsskick, kunskaps- och tekniknivå har betydelse för människors agerande på förvarsplatsen. I syfte att ge en så heltäckande belysning som möjligt av olika mänskliga handlingar som kan komma att påverka djupförvaret samt deras bakgrund och syfte har följande systematik använts /OECD NEA, 1995; Morén m fl, 1998/:

A. Teknisk analys:

Använd förvarets systembeskrivning och identifiera mänskliga handlingar som kan påverka förvarets funktion, beskriv och motivera handlingarna i tekniska termer.

B. Analys av samhällsfaktorer:

Beskriv samhällsfaktorer och -förhållanden av betydelse för huruvida mänskliga handlingar med inverkan på förvarets säkerhet kommer att genomföras.

C. Val av representativa scenarier:

Lägg ihop resultaten av de tekniska och samhällsvetenskapliga analyserna och välj ett antal scenarier som illustrerar hur några framtida mänskliga handlingar kan komma att påverka förvaret.

D. Analys av de valda scenarierna:

Beskriv de valda handlingarna i detalj, utred deras konsekvenser och sannolikheten att de inträffar.

Framtida mänskliga handlingar som kan påverka ett förvars säkerhet omfattar förutom tekniska aspekter frågor kring samhällets utveckling och människors beteende.

Exempel på sådana frågor är:

- Hur kommer teknik och vetenskap att utvecklas?
- Hur kommer det framtida samhället att se ut?
- Hur kommer människornas levnadsförhållanden att vara?

Svar på denna typ av frågor går inte att finna med gängse vetenskapliga metoder. Det går t ex inte att förutsäga kunskap som inte existerar idag, och kunskap bedöms vara en nyckelfaktor i sammanhanget. För att formulera scenarier baserade på mänskliga handlingar är man hänvisad till dagens kunskaper, inhämtade från människor som lever och verkar idag. En ambition har varit att infoga erfarenheter från människor med expertkunskap inom ett brett spektrum av olika relevanta områden. För att åstadkomma det har momenten A och B ovan – teknisk analys och analys av samhällsfaktorer – behandlats vid arbetsmöten dit experter med olika bakgrund och kunskaper har bjudits in /Morén m fl, 1998/.

12.3 Teknisk analys

För att genomföra moment A – Teknisk analys – valdes en grupp tekniker med god kunskap inom områdena geoteknik, geologi, geohydrologi, kemi, systemanalys och riskanalys ut. Genomgången av de tekniska aspekterna av mänskliga handlingar på förvarsplatsen gjordes vid ett arbetsmöte /Morén m fl, 1998/. Mötets uppgift var att:

- baserat på dagens tekniska kunskaper göra en lista med mänskliga handlingar som kan påverka förvarssystemet,
- beskriva och motivera handlingarna i tekniska termer.

De mänskliga handlingar som söktes skulle påverka förvarsfunktionerna och vara genomförbara och trovärdiga ur teknisk synvinkel. För att få en systematiskt uppställd och någorlunda fullständig lista över handlingar identifierades de med stöd av systembeskrivningen i form av THMC-diagram (se avsnitt 4.2 samt kapitel 5).

En inventering av tänkbara handlingar inom varje kategori genomfördes, handlingarna redovisas i tabell 12-1. Det bör påpekas att de mänskliga handlingar som uppfyller beskrivningen ovan medför påverkan inom flera av kategorierna T, H, M och C.

Tabell 12-1. Mänskliga handlingar som kan påverka ett djupförvar indelat i kategorierna T, H, M och C /Morén m fl, 1998/.

Kategori	Nr	Handling
Termisk påverkan (T)	T1	Bygga värmelager*
	T2	Bygga värmepumpanläggning*
	T3	Utvinna geotermisk energi (geotermi)*
	T4	Bygga anläggning som genererar värme/kyla på ytan av förvaret
Hydrologisk påverkan (H)	H1	Anlägga brunn*
	H2	Bygga damm
	H3	Ändra ytvattens (vattendrag, sjöar, hav) sträckning, utbredning och förbindelser med andra ytvatten
	H4	Bygga anläggning för vattenkraft*
	H5	Bygga anläggning för dränage
	H6	Bygga anläggning för infiltration
	H7	Bygga anläggning för bevattning*
	H8	Ändra förhållanden för grundvattenbildning genom ändrad markanvändning
Mekanisk påverkan (M)	M1	Borra i berget*
	M2	Bygga berggrum, tunnel, schakt etc*
	M3	Anlägga dagbrott*
	M4	Anlägga tipp
	M5	Bomba eller spränga på ytan av förvaret
Kemisk påverkan (C)	C1	Förvara miljöfarligt avfall i berget*
	C2	Anlägga soptipp
	C3	Försura luft och mark
	C4	Sterilisera mark
	C5	Orsaka olycka med spridning av kemikalier som följd

*) Omfattar, eller kan omfatta, borring och/eller byggande av berggrum.

Systembeskrivningen i form av THMC-diagram användes också som ett redskap för att bedöma vilka av de identifierade handlingarna som har störst inverkan på förvarets funktion och säkerhet. Det konstaterades att handlingar som inkluderar borrhande och/eller byggande i berget är de med potentiellt störst inverkan på förvarssystemet.

En teknisk bedömning av förvarsplatsens lämplighet för handlingarna i tabell 12-1 är att den vad gäller byggande av värmelager eller värmepumpanläggning är mer gynnsam än andra platser, på grund av den värme som det använda bränslet avger. För de övriga handlingarna är förvarsplatsen likvärdig eller mindre gynnsam än andra platser med likartad berggrund.

Några andra tekniska aspekter av mänskliga handlingar på förvarsplatsen är:

- Möjligheten till framtida mänskliga handlingar som kan påverka förvaret har övervägts vid förvarsutformning och platsval.
- För att en handling ska genomföras krävs att någon är villig att betala för den, eller att den förväntas ge en vinst som täcker kostnaderna för att genomföra handlingen.
- Såväl kostnader som eventuella vinster är kopplade till teknikutveckling och utvecklingen i samhället i stort.
- Nyttjandetiden för anläggningar skapade av människan, som omfattar någon typ av kontinuerlig drift, kan antas vara tiotals till maximalt hundratals år.

12.4 Analys av samhällsfaktorer

För att kunna bedöma konsekvenserna av ett ingrepp på förvarsplatsen är det viktigt att utreda varför den störande handlingen genomförs och de samhälleliga förhållanden som råder vid tidpunkten för störningen. Detta är huvudsakligen ett humanistiskt, samhällsvetenskapligt problem.

För att belysa humanistiska och samhällsvetenskapliga aspekter och för att genomföra moment B (Analys av samhällsfaktorer) i strategin genomfördes ytterligare ett arbetsmöte med experter inom områdena kulturgeografi, teknik- och vetenskapshistoria samt systemanalys. Ramsscenarier som beskriver trovärdiga samhälleliga sammanhang för framtida mänskliga handlingar med inverkan på djupförvarets radiologiska säkerhet formulerades /Morén m fl, 1998/. Tidsperspektivet begränsades till 50–500 år, eftersom det inte bedömdes meningsfullt att spekulera om vad som är ett möjligt, sannolikt eller troligt mänskligt handlande i längre tidsperspektiv än så.

För att ta fram ramsscenarierna användes sk morfologisk analys /Morén m fl, 1998; Ritchey, 1997/, en grupp- och processororienterad interaktiv metod för att strukturera och analysera komplexa problemområden som inte är kvantifierbara, innehåller icke bestämbara osäkerheter och kräver ett bedömningsmässigt angreppssätt. Man arbetar med ett sk morfologiskt fält, en matris som beskriver problemområdets dimensioner och utfallsrum. Kolumnernas rubriker anger de väsentliga parametrar (faktorer eller variabler) som problemställningen ska baseras på. På raderna anges de alternativa värden eller tillstånd som varje parameter kan ha.

För mänskliga handlingar vid förvarsplatsen identifierades följande väsentliga parametrar och deras "värden":

- **Bebyggelsemönster:** geo-demografiskt mönster på eller nära intill förvaret.
 - Megalopolis – De flesta bor i mycket stora "moderna" städer (av typen New York, Tokyo, Los Angeles).
 - X-stad – De flesta bor i städer och tätorter som är fördelade med ett linjärt avtagande samband mellan storlek och antal (ungefär som Sverige idag).
 - Glest – Bebyggelsen är utspridd på en stor yta. "Glest modernt" (som Island, Kanada idag) eller "glest förfall".
- **Allmän vetenskaps- och kunskapsnivå:** relativt västvärlden idag.
 - Mycket hög, men endast hos en elit.
 - Mycket hög hos allmänheten.
 - Ungefär som idag.
 - Betydligt lägre.
- **Transportsystem:** relativt västvärlden idag.
 - Väsentligt ökad kapacitet (snabbare, mer effektivt, tillförlitligt, tillgängligare, billigare, renare).
 - Som idag eller något ökad kapacitet.
 - Minskad kapacitet.
 - Förfall – innebär att något händer som gör att utvecklingen går i en nedbrytande riktning. Det kan vara krig, miljöförstöring och/eller naturkatastrofer som föröder resurserna så att de inte går att återställa, än mindre fortsätta att utveckla. Detta kan ske mer eller mindre dramatiskt, över lång eller kort tid.
- **Informationssystem:** relativt västvärlden idag.
 - Väsentligt ökad kapacitet.
 - Som idag eller något ökad kapacitet.
 - Minskad kapacitet.
 - Förfall (se ovan).
- **Kunskap om förvaret:** existens, egenskaper och läge.
 - Allmänt känt.
 - Känt endast av en elit.
 - Bara lokalt känt. (Exempel: Den lokala befolkningen har "ryktet" eller "myten" om förvaret kvar som en del av sin lokala kultur.)
 - Förlorad.

- **Samhällsskick:** legitimitet hos styrelseform och relativ styrbarhet i samhället. Legitimitet beskriver i vilken utsträckning befolkningen ger de styrande sitt godkännande och stöd. Styrbarhet beskriver i vilken utsträckning befolkningen följer de lagar och regler som de styrande beslutar om.
 - Hög legitimitet och styrbart samhällssystem.
 - Hög legitimitet och svårstyrt samhällssystem.
 - Låg legitimitet och styrbart samhällssystem.
 - Låg legitimitet och svårstyrt samhällssystem.
- **Syfte:** med handlingen som påverkar förvaret.
 - Att hämta upp en annan resurs än det radioaktiva avfallet eller att bygga något i berget (förvaret okänt).
 - Att ta upp avfallet som resurs eller för att omplacera det.
 - Att kontrollera förvaret och dess säkerhet.
 - Att kartera och undersöka området (förvaret okänt).
 - Att sabotera förvaret, bedriva utpressning m m, dvs ond avsikt.

Det morfologiska fält gruppen använde visas i figur 12-1.

Bebyggelse-mönster (geo-demo)	Allmän veten- och kunskapsnivå	Transport-system	Informations-system	Kunskap om förvaret	Samhälls-skick	Syfte med störning
Megapolis	Mycket hög hos elit	Ökad kapacitet	Ökad kapacitet	Allmänt känt	Legitimt Svårstyrt	Hämta annan resurs eller bygga
X-stad	Allmänt hög (mycket högre än idag)	Som idag	Som idag	"Elit"-känt	Legitimt Styrbart	Ta upp som resurs
Glest	Som idag	Minskad kapacitet	Minskad kapacitet	Lokalt känt (bara)	Olegitimt Styrbart	Kontrollera förvaret
	Lägre än idag	Förfall	Förfall	Förlorad	Olegitimt Svårstyrt	Kartering/ undersökning
						Sabotage

Figur 12-1. Morfologiskt fält för sambälleliga sammanhang för mänskliga handlingar som kan påverka djupförvarets funktion och säkerhet.

Vid analysen av det morfologiska fältet går gruppen igenom parametrarna parvis. Varje par av "parametervärden" bedöms på en 3- eller 5-gradig skala. Extremvärdena på skalan är att de båda "parametervärdena" förutsätter respektive motsäger varandra, mittvärdet är att de är neutrala. Att värdena förutsätter varandra innebär att om det ena gäller måste även det andra gälla. En motsägelse innebär att om det ena gäller är det andra omöjligt. Mittvärdet anger att de båda värdena varken förutsätter eller motsäger varandra, de beskrivna förhållandena kan samexistera. På den 5-gradiga skalan finns dessutom ytterligare två lägen, som anger att de båda "parametervärdena" i viss mån förutsätter alternativt motsäger varandra. Den 5-gradiga skalan användes.

Då alla kombinationer diskuterats undersöks det morfologiska fältet i syfte att finna interna samband, mönster och konsekventa konfigurationer. I ett första steg tas alla motsägelsefulla kombinationer bort. De konfigurationer som blir kvar studeras mot bakgrund av analysens syfte. Denna analys visade att av totalantalet internt konsekventa konfigurationer, den sk lösningsrymden, dominerade tre parametrar:

1. den allmänna vetenskaps- och kunskapsnivån,
2. kunskapen om förvarets existens samt
3. avsiktligheten när det gäller störning av förvaret.

Dessa tre parametrar är alltså avgörande för alla tänkbara framtida mänskliga handlingar på förvarsplatsen. Dessutom tillkom en parameter, som beskriver den socio-tekniska utvecklingsprocessen som kontinuerlig eller diskontinuerlig. En diskontinuerlig utveckling innebär att utvecklingen innehåller en plötslig, stor förändring. Efter analysen kunde således det morfologiska fältet reduceras till den form som beskrivs i figur 12-2.

Allmän veten- och kunskapsnivå	Kunskap om förvaret	Syfte med störning	Samhälls-utvecklings-process
Mycket hög hos elit	Allmänt känt	Hämta annan resurs eller bygga	Kontinuerlig
Allmänt hög (mycket högre än idag)	"Elit"-känt	Ta upp som resurs	Dis-kontinuerlig
Som idag	Lokalt känt (bara)	Kontrollera förvaret	
Sämre än idag	Förlorad	Kartering/undersökning	
		Sabotage	

Figur 12-2. Det morfologiska fältet efter analysen.

Inom denna lösningsrymd identifierades fyra ramsscenarier för oavsiktlig mänsklig påverkan på djupförvaret. Scenarierna gavs benämningarna Det lutande planet (figur 12-3), Kollapsen (figur 12-4), Återhämtningen (figur 12-5) samt Selektiv glömska (figur 12-6).

Det lutande planet

Allmän vetenskapnivå	Kunskap om förvaret	Syfte med störning	Samhällsutvecklingsprocess
Mycket hög hos elit	Allmänt känt	Hämta annan resurs eller bygga	Kontinuerlig
Allmänt hög (mycket högre än idag)	"Elit"-känt	Ta upp som resurs	Dis-kontinuerlig
Som idag	Lokalt känt (bara)	Kontrollera förvaret	
Lägre än idag	Förlorad	Kartering/undersökning	
		Sabotage	

Samhället är i fortskridande förfall. Den allmänna vetenskaps- och kunskapsnivån är lägre än i västvärlden idag.

Kunskapen om förvaret är borta. Förvaret kan i detta samhälle komma att störas oavsiktligt. Man bygger något i berget vid förvaret, t ex i syfte att hämta upp en resurs.

Ett annat syfte kan vara att man borrar i berget för att kartera eller undersöka området.

Figur 12-3. Ramsscenariot *Det lutande planet*.

Kollapsen

Allmän vetenskapnivå	Kunskap om förvaret	Syfte med störning	Samhällsutvecklingsprocess
Mycket hög hos elit	Allmänt känt	Hämta annan resurs eller bygga	Kontinuerlig
Allmänt hög (mycket högre än idag)	"Elit"-känt	Ta upp som resurs	Dis-kontinuerlig
Som idag	Lokalt känt (bara)	Kontrollera förvaret	
Lägre än idag	Förlorad	Kartering/undersökning	
		Sabotage	

En dramatisk händelseutveckling har inträffat och vi befinner oss i en period efter ett (möjligtvis globalt) samhälleligt sammanbrott.

Den allmänna kunskapsnivån är lägre än idag och kunskapen om förvaret är antingen borta eller finns bara lokalt i form av en lokal kultur som bygger på myter och historier.

Förvaret kan i detta samhälle (liksom i *Det lutande planet*) komma att störas oavsiktligt. Som ovan, bygger man något i berget vid förvaret t ex i syfte att hämta upp en resurs, eller borrar man i berget för att kartera eller undersöka området.

Figur 12-4. Ramsscenariot *Kollapsen*.

Återhämtningen

Allmän veten- och kunskapsnivå	Kunskap om förvaret	Syfte med störning	Samhälls-utvecklings-process
Mycket hög hos elit	Allmänt känt	Hämta annan resurs eller bygga	Kontinuerlig
Allmänt hög (mycket högre än idag)	"Elit"-känt	Ta upp som resurs	Dis-kontinuerlig
Som idag	Lokalt känt (bara)	Kontrollera förvaret	
Lägre än idag	Förlorad	Kartering/undersökning	
		Sabotage	

Figur 12-5. Rams scenariot Återhämtningen.

En dramatisk händelseutveckling har inträffat och vi befinner oss i en period efter sammanbrottet (diskontinuitet i samhälls-utvecklingen).

Till skillnad från Kollapsen har samhället byggts upp på nytt. Den allmänna kunskapsnivån är högre än i västvärlden idag. Kunskapen om förvaret har dock gått förlorad.

Syftet med störningen är som ovan, men konsekvenserna kan vara annorlunda.

Selektiv glömska

Allmän veten- och kunskapsnivå	Kunskap om förvaret	Syfte med störning	Samhälls-utvecklings-process
Mycket hög hos elit	Allmänt känt	Hämta annan resurs eller bygga	Kontinuerlig
Allmänt hög (mycket högre än idag)	"Elit"-känt	Ta upp som resurs	Dis-kontinuerlig
Som idag	Lokalt känt (bara)	Kontrollera förvaret	
Lägre än idag	Förlorad	Kartering/undersökning	
		Sabotage	

Figur 12-6. Rams scenariot Selektiv glömska.

Viss kunskap har försvunnit även om kunskapsnivån i stort har ökat.

På grund av ny (för närvarande okänd eller "ospecificerad") kunskapsutveckling kan andra, specifika kunskapsområden ha fallit i träda.

Fissionskraften och därmed nuvarande kärnkraftsteknologi blir överspelad av radikalt nya energiteknologier (t ex fusionskraft, fotosyntes, vakuumentergi).

Kärnavfall är inte längre en viktig och omdebatterad fråga, förvarsplatsen överges och så småningom glöms förvaret bort.

En slutsats från studien av samhällsaspekter var att det är svårt att föreställa sig oavsiktlig påverkan vid en kontinuerlig samhälls- och kunskapsutveckling. På grund av det långa tidsperspektivet går det dock inte att utesluta att förvaret och dess syfte glöms bort även om både samhälle och kunskaper successivt utvecklas. Det går inte heller att garantera att samhällskontrollen över förvarsplatsen bibehålls i ett långt tidsperspektiv. Vid en diskontinuerlig utveckling är det rimligt att kunskap går förlorad och institutioner bryts ned.

12.5 Val av representativa scenarier

Det är troligt att förvarsplatsen i framtiden kommer att utnyttjas av människor. I säkerhetsanalysen beaktas mänskliga handlingar som påverkar den radiologiska säkerheten och som sker utan kunskap om förvaret och/eller dess syfte. Handlingar som påverkar isoleringen av det använda bränslet har störst betydelse för säkerheten, därefter följer handlingar som påverkar förvarets förmåga att hålla kvar och fördröja radionuklider om isoleringen av någon annan orsak redan brutits. Förändringar i biosfären påverkar de doser människor kan komma att utsättas för i samband med att otäta kapslar finns.

Djupförvaret skall placeras på 400–700 meters djup i berget. Skälet till detta är att man vill placera förvaret i en miljö där isoleringen av bränslet bibehålls, även vid omfattande förändringar på ytan. Förändringar som övervägts är naturliga förändringar och förändringar orsakade av människan. Exempel på naturliga förändringar är att förvarsplatsens läge i förhållande till havet ändras, samt närvaron av permafrost och inlandsis. De naturliga förändringarna påverkar människornas möjligheter att utnyttja förvarsplatsen.

Stora osäkerheter är förknippade med teknikens och samhällets utveckling. Det går inte att hävda att någon av handlingarna i tabell 12-1 är mer representativ eller trolig än någon annan. Av samma skäl går det inte att ge detaljerade tekniska beskrivningar av framtida anläggningar, eller att beskriva framtidens samhälle och levnadsvillkor. Valet av scenarier utgår därför från dagens kunskap och erfarenheter.

Samtliga handlingar i tabell 12-1 påverkar spridningen av radionuklider i biosfären. Handlingar som genomförs på eller nära ytan, ned till några tiotals meters djup, bedöms dock inte kunna påverka de tekniska barriärerna och isoleringen av bränslet. Detta gäller sålunda handlingarna T4, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, H9, M3, M4, C2, C3, C4 och C5. Verksamheter nära ytan som tillhör kategorierna M och H bedöms ha mindre inverkan på förvaret än naturliga förändringar i samband med framtida klimatförändringar (se kapitel 10). Av de handlingar som innebär en kemisk påverkan (C2–C5) har försurning av luft och mark (C3) studerats närmare. I realistiska fall av försurning från atmosfärisk svavel- och koldioxid påverkas inte miljön på förvarsdjup /Nebot och Jordi, 1991; Wersin m fl, 1994/. Även mot andra kemiska föreningar bedöms jordlager och berggrund fungera effektivt som både filter och buffert.

Fallet bombning eller sprängning på markytan ovanför förvaret (M5) kan inte påverka avfallets isolering utom i fallet att sprängningen sker med ett kraftigt kärnvapen. En sådan händelse i sig bedöms vara mycket osannolik, dessutom är konsekvensen av själva sprängningen avsevärt större än den som kan följa från läckage från förvaret.

Några av handlingarna i tabell 12-1 kan – förutom att de påverkar radionuklidtransporten – indirekt påverka isoleringen av avfallet om de medför att miljön på förvarsdjup inte längre förblir stabil. Sådana handlingar utförs direkt ovanför eller nära djupförvaret och omfattar borrhning och/eller byggande i berget (M1, M2). Hit hör de handlingar som har att göra med värmeutvinning (T1, T2, T3), anläggning av brunn (H1) och förvaring av miljöfarligt avfall i berget (C1). Eventuellt kan även anläggningar för vattenkraft (H5) och dagbrott (M3) omfatta borrhning eller bergarbeten till stort djup. Innan en berganläggning byggs genomförs borrhningar för att undersöka berget. Gemensamt för samtliga dessa fall är därför att de med nuvarande teknik omfattar borrhning i berget.

Större berganläggningar i anslutning till förvaret bedöms vara helt uteslutna i ett kortare tidsperspektiv, dvs tiotals till något eller några hundratals år. Detta av flera skäl, t ex är djupförvaret en stor berganläggning – unik i Sverige i sitt slag – som med stor sannolikhet inte kommer att glömmas i detta tidsperspektiv. Den institutionella kontrollen kan förväntas bestå i detta tidsperspektiv. De uppräknade handlingarna som omfattar större bergarbeten är utifrån dagens teknik och ekonomi mindre troliga. I ett något längre tidsperspektiv, dvs några eller flera hundratals år och längre är det svårt att bedöma kunskaps-, teknik- och samhällsutveckling, och därmed om, hur och varför man kommer att bygga berganläggningar. Om byggande av djupa berganläggningar skulle bli vanligt förekommande, kan man dock räkna med att både bygg- och undersökningsmetoder förbättrats gentemot dagens teknik. Ett utökat byggande av djupa berganläggningar skulle därmed även medföra att sannolikheten att upptäcka förvaret i samband med byggnationen ökar.

Förändringar av radionuklidtransporten genom förvarets barriärer samt tidpunkten då isoleringen bryts redovisas inom kapseldefektsscenariot (kapitel 9). Konsekvenserna av flertalet fall med berganläggningar faller därmed inom de ramar som ges av osäkerhetsanalyserna i kapseldefektsscenariot. För att göra utförliga konsekvensanalyser av de uppräknade handlingarna krävs långtgående antagande om anläggningarnas utformning och syfte. Mot bakgrund av de stora osäkerheterna kring teknik- och samhällsutveckling, bedöms sådana antaganden inte vara meningsfulla.

Av handlingarna i tabell 12-1 bedöms ”Borra i berget” vara den enda som direkt kan medföra att kopparkapseln penetreras och isoleringen bryts, och som samtidigt kan tänkas ske oavsiktligt, är tekniskt möjlig, genomförbar och trovärdig. ”Borra i berget” är vidare en tänkbar handling mot bakgrund av rams scenarierna i avsnitt 12.4. Visserligen går det att bygga ett bergrum, tunnel eller schakt eller att anlägga ett dagbrott som medför att kopparkapseln penetreras, men att göra det utan att ha undersökt berget så att förvaret upptäckts, dvs utan kunskap om förvaret, bedöms inte vara tekniskt trovärdigt. Scenariot genomborrning av kapsel har därför valts ut som det enda mänskligt orsakade scenario vars konsekvenser utreds närmare. Förutom av de skäl som anges ovan motiveras valet av att konsekvenserna av en genomborrning faller helt utanför de analyser som gjorts inom kapseldefektsscenariot.

12.6 Analys av scenariot – borrning av djupa borrhål

Analysen sker som en riskanalys där risk är produkten av sannolikhet att en oönskad händelse inträffar och dess konsekvenser. Som acceptanskriterium anger SSI en årlig risk av 10^{-6} för personer som utsätts för strålning från förvaret. Risker gäller cancer eller ärftliga skador. För en tänkt situation då exponering säkert sker motsvarar det en årlig stråldos av $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/år. Här analyseras djupförvarets betydelse för riskerna förknippade med borrning av djupa borrhål och följande punkter behandlas i analysen:

- borrningens genomförande och syfte,
- sannolikheten att borra genom en kapsel,
- händelsens radiologiska konsekvenser och risk.

Konsekvensen – dvs inverkan på förvarssystemet och det utsläpp av radionuklider det leder till – går inte att kvantifiera utan beskrivningar av hur borrningen gått till. Dessutom måste antaganden om människors beteende i samband med händelsen göras. Gjorda antaganden baseras på dagens teknik och förutsättningar, spekulationer om framtida förhållanden har undvikits så långt möjligt.

12.6.1 Borrningens genomförande och syfte

Den använda borrhållstekniken beror på syftet med borrningen. Idag borrar för att anlägga brunnar, för uttag av bergvärme och i undersökningssyfte. Bergbrunnar borrar normalt till mellan 50 och 100 meter, brunnar ned till 130–150 meter förekommer. Djupare brunnar förekommer men är mycket ovanliga. Anledningen är att det är dyrt att borra samt att sannolikheten att träffa på tjänligt vatten i tillräcklig mängd minskar med djupet. De djupare brunnarna används oftast för att utvinna värme. Brunnsborrning sker i allmänhet med sk hammarborrning. Dagens standardutrustningar klarar att borra till max 200–250 meters djup. Borrning till större djup sker i undersökningssyfte, i allmänhet prospektering. Mot bakgrund av detta antas att borrningen genomförs i undersökningssyfte.

Speciell hammarborrning förekommer vid oljepropektering, men vid borrning i undersökningssyfte tillämpas i allmänhet diamanthammarborrning. Borrkärnan tas då upp i rör med en maximal längd av sex meter. Den besiktigas och placeras i lådor med en meter långa fack. Då och då besiktigas kärnorna av en geolog. Borrkaxet (det pulveriserade berget blandat med borrens kylvatten) avlägsnas vanligen med vatten, som också kyler borren. Vattnet med borrkax sprids oftast på marken runt borrhålet.

Då borrningen är klar skickas lådorna med kärnor till kärnkartering och borrhålet överges. Om hålet passerat någon zon med stort vattenflöde, så att mycket vatten förs upp till ytan, kan borrhålet fyllas igen. Det sker i allmänhet bara om flödet innebär en olägenhet för kringboende.

Diametern på hålet följer standard och är 46 mm, 56 mm, 66 mm osv. Vid prospektering används i allmänhet 46 mm eftersom det är tillräckligt och billigast. SKB använder 56 och 76 mm för att kunna få ned önskad mätutrustning. Borrhålets riktning varierar beroende på ändamålet och vad som är känt om den bergvolym man vill undersöka. I allmänhet lutar borren något, vinkeln mot markplanet är vanligen 70–85 grader. Om borren når bufferten och kapseln kan dessa penetreras utan att man märker något speciellt förrän borrkärnan besiktigas.

12.6.2 Sannolikhet att scenariot inträffar

Endast borrningar som sker utan kunskap om förvarets läge och syfte beaktas. För att förhindra oavsiktlig påverkan på förvaret planeras olika åtgärder t ex att bevara informationen om förvaret i arkiv, att märka ut platsen samt olika typer av kontroll av platsen. Exempel på kontrollåtgärder är fysisk övervakning, ägandeförhållanden och restriktioner av markanvändningen. Denna typ av åtgärder borde rimligen bidra till att minska sannolikheten för oavsiktlig genomborrning. Det går dock aldrig att garantera att kunskap och kontroll bevaras.

Här antas att kunskapen om förvarets läge och syfte kommer att bevaras i hundra år efter det att förvaret förslutits. Sannolikheten för oavsiktlig påverkan är noll under denna tid. Antagandet grundar sig på bedömningen att det tar åtminstone tre generationer innan en kunskap glöms bort. Hur kunskapen om förvaret förändras i ett långt tidsperspektiv är mycket osäkert. Här antas att all kunskap om förvaret är förlorad om 300 år, dvs sannolikheten att förvaret glömts är 1 om 300 år. Tiden mellan 100 och 300 år antas sannolikheten för att förvarets syfte och läge glömts öka linjärt.

Sannolikheten för att ett (1) djupt borrhål borrar på förvarsplatsen kan uppskattas under förutsättning att:

- Endast borrning inom Sverige beaktas.
- Borrning på förvarsplatsen är lika troliga som på andra platser med likartad berggrund.

Gäller dessa förutsättningar kan sannolikheten att borra igenom en kapsel uppskattas som produkten av följande två sannolikheter:

1. sannolikheten att borra inom förvarsområdet,
2. sannolikheten att borra igenom en kapsel förutsatt att man borrar inom förvarsområdet.

Sannolikheten för den första är cirka $5 \cdot 10^{-6}$, och har beräknats som kvoten mellan förvarets yta och den totala ytan inom Sverige med likartad berggrund ($1 \text{ km}^2/200 \text{ 000 km}^2$). Den andra sannolikheten har genom en geometrisk betraktelse av förvarslayouten uppskattats till cirka en procent. Sannolikheten att borra igenom en kapsel blir således $5 \cdot 10^{-8}$ per borrar djupt hål. Det betyder att om man i Sveriges urberg borrar 200 djupa borrhål per år, varje år under en hundratusen år lång period, blir sannolikheten 1 att man någon gång borrar igenom en kapsel. De uppskattade sannolikheterna är sammanställda i tabell 12-2.

Tabell 12-2. De uppskattade sannolikheterna för att oavsiktligt borra igenom en kapsel.

Händelse	Sannolikhet
Kunskapen om förvaret och dess innehåll har förlorats	0 under 100 år 1 efter 300 år
Borrhålet hamnar inom förvarsområdet	Linjär ökning från 0 till 1 i perioden mellan 100 och 300 år
Borrhålet genomtränger en kapsel	10^{-5} 10^{-2}

Att försöka uppskatta antalet borrhål som årligen kommer att borraras i undersöknings-syfte långt in i framtiden bedöms inte meningsfullt. Idag borraras en längd av cirka 200 000–230 000 meter per år (diamantborrning med uttag av kärna). Medeldjupet bedöms vara cirka 400 meter, vilket ger 500–600 djupa borrhål per år. Syftet med borrhningarna är i allmänhet prospektering och cirka 60 procent äger rum i anslutning till befintliga gruvor. Majoriteten av borrhningarna sker i Övre Norrland /Berglund, 1999/. Förvaret placeras inom ett område som idag är ointressant för prospektering. Eftersom området är lämpligt för byggande av bergrum kan borrhningar i byggnads-geologiskt syfte dock tänkas förekomma. Idag genomför SKB sådana borrhningar.

12.6.3 Radiologiska konsekvenser och risk

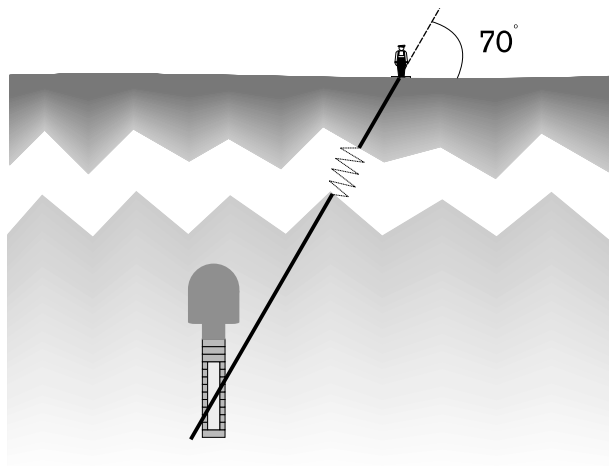
I scenariot antas att förvaret och dess syfte glömts. Berget undersöks med borrhning och man får upp en borrhkärna som innehåller stycken av ren koppar, gjutjärn och små rörbitar med sprucken urandioxid. Borrhkärnan transporteras bort för att undersökas närmare. Man anar oråd och beslutar att inte gå vidare med undersökningarna. Platsen och borrhålen överges utan vidare åtgärder. En tid senare flyttar en familj till platsen och driver där ett självförsörjande jordbruk. Två exponeringssituationer utreds:

- Dos och risk för borrhpersonalen om de utsätts för strålningen från radionukliderna i borrhkax och borrhkärna.
- Dos och risk för individer i familjen om de utsätts för upptransporterade radionuklider under förutsättning att bergets och kapselns förmåga att förhindra radionuklidtransport har förlorats, men buffertens funktion bevaras.

Stråldos och risk för borrhpersonalen

Dosen borrhpersonalen utsätts för beror dels på mängden avfall och dess innehåll av radionuklider, dels på hur de exponeras för avfallet /Bergström m fl, 1995; Wuschke, 1996/. Borrhteknikerna antas ha använt sig av diamantborrning med uttagande av kärna (se avsnitt 12.6.1). Kärnans diameter antas vara 46 mm, borrhålets yttre diameter 52 mm och lutningen mot markplanet 70 grader. Borrhkaxet avlägsnas med vatten och sprids på en cirkulär yta som antas ha diametern tre meter med borrhålet i centrum. De uttagna kärnorna antas delas i 1 m långa delar och placeras just utanför området med borrhkax. Personalen utsätts för yttre bestrålning från borrhkärnan och den borrhdammsvätta markytan, samt från borrhdammsvätta kläderna /Bergström m fl, 1995/. De antas också inandas kontaminerat damm /Wuschke, 1996/. Dammhalten i luften har satts till 100 mg/m³, vilket kan jämföras med Naturvårdsverkets riktvärde för luftkvalitet i tätorter där dygnsmedelvärdet är 115 mg/m³ och halvårsmedelvärdet 50 mg/m³. Dammets är en blandning av jord och kontaminerat borrhkax. Inventariet i borrhkaxet antas jämnt fördelade i de 10 översta centimetrarna jord. Antaganden av geometrisk karaktär redovisas i figur 12-7.

Den externa stråldosen från borrhkärnan beror på borrhkärnans tjocklek och längd samt avståndet mellan den exponerade personen och borrhkärnan. Störst betydelse har avståndet till borrhkärnan. Dosen från den borrhkaxvätta ytan beror på ytans storlek och var personen befinner sig i förhållande till ytan. Dosen från de neddammade kläderna beror av dammlagrets tjocklek och storlek, samt var på kroppen dammet hamnar. Osäkerheten i beräkningen av den externa dosen har uppskattats till en faktor 10, både lägre och högre doser är möjliga /SKB, 1995/. Dosen från inandning av damm beror av dammets innehåll av radionuklider och är direkt proportionell mot den antagna dammhalten i luften. Eftersom borrhkaxet avlägsnas via vatten är troligen dammhalten i luften mindre än den antagna.

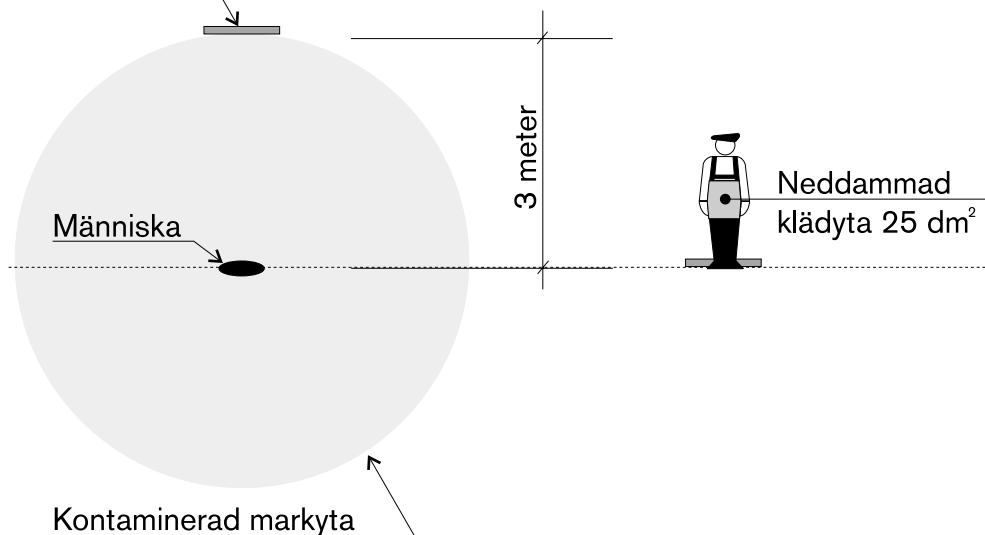


PLAN

Borrkärna:

Längd 1 m

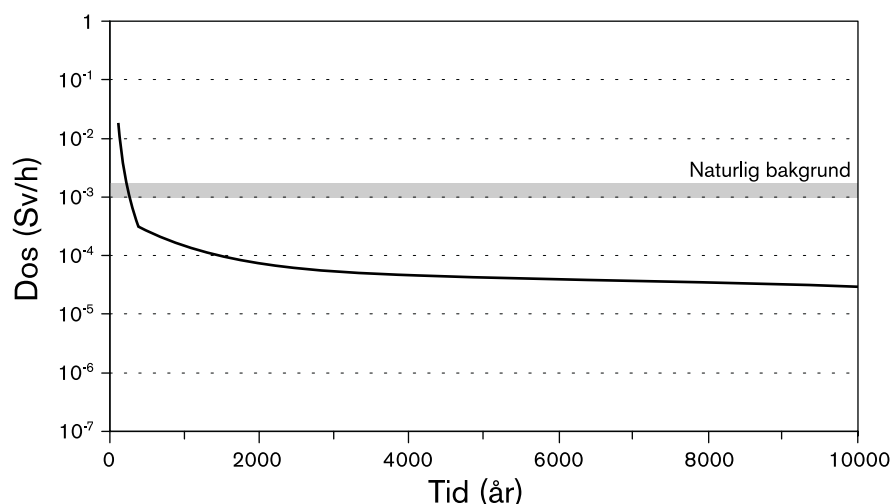
Radie 23 mm



SKÄRNING

Figur 12-7. Övre delen: Borrningens genomförande. Undre delen: Den exponerade människans position i förhållande till strålkällorna.

Stråldosen till en person som under en timmes tid inandas kontaminerat damm, samt utsätts för externbestrålning från borrkärna, borrkax och neddammade kläder visas i figur 12-8. I takt med att det använda bränslets farlighet avtar minskar den potentiella dosen. Som en jämförelse visas även den naturliga bakgrundsivån. Under de första 200–300 åren efter förvaret stängts kommer borrpersonalen i vårt scenario att få en dos som överskrider bakgrundsstrålningen. Den maximala dosen per timma är cirka 20 mSv, dvs av samma storlek som den årsdos som idag tillåtes för personer verksamma i radiologiskt arbete.



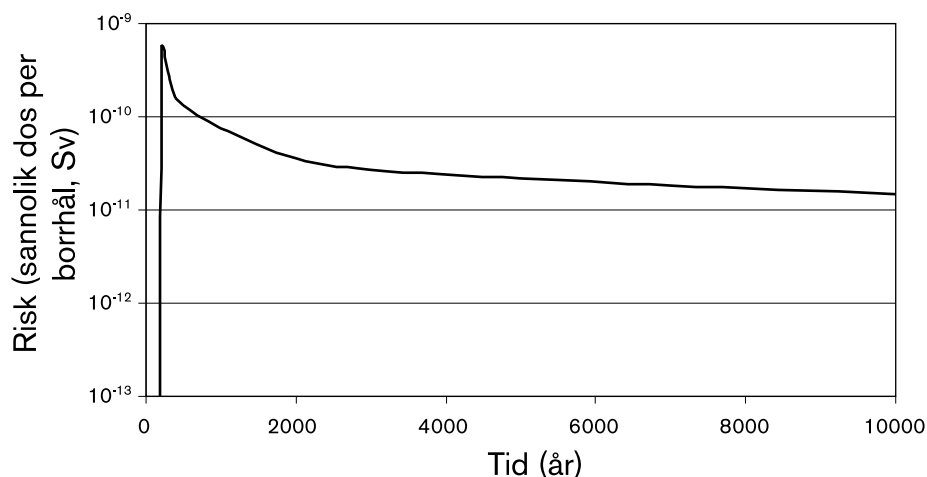
Figur 12-8. Dos till borrarpersonalen som funktion av tid efter förslutning av förvaret. Exponeringstiden är en timme. Personen inandas kontaminerat damm och utsätts för externbestrålning. Strålkällorna och människans position i förhållande till dem redovisas i figur 12-7.

Risken framtida borrarpersonal utsätts för på grund av att djupförvaret byggts är en produkt av sannolikheten att man råkar borra igenom en kapsel och denna händelses konsekvenser. Med antagandet att borrarpersonalen utsätts för en dos som är fem gånger den beräknade dosen per timme då de borrar igenom en kapsel, kan risken per borrhål uppskattas. Denna risk är produkten av följande faktorer:

- sannolikheten att förvaret har glömts bort,
- sannolikheten att man borrar genom en kapsel,
- konsekvensen uttryckt som den stråldos borrarpersonalen utsätts för.

Risken för personer som ofrivilligt borrar genom en kapsel med använt kärnbränsle visas i figur 12-9. Risken gäller per borrhål och den beskrivna exponeringen.

Den maximala risken per borrhål uppnås vid cirka 200 år efter förvarets stängning och är cirka $5 \cdot 10^{-10}$. Acceptanskriteriet anges som en årlig risk och en dos som är relaterad till denna risk. För att kunna jämföra den beräknade risken med acceptanskriteriet krävs således kunskap om hur många borrhål som borraras per år, en uppgift som saknas. Under den period som risken är som störst krävs det cirka 30 000 borrhål/år för att komma upp i en årlig risk som motsvarar en dos av $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv för utsatta personer. En enskild person kan knappast borra så många borrhål under ett år, det är inte heller troligt att det finns så många personer som sysslar med att borra borrhål att de tillsammans kommer upp i detta höga antal. Risken framtida borrarpersonal utsätts för på grund av att djupförvaret byggts är därför rimligen lägre än den accepterade.



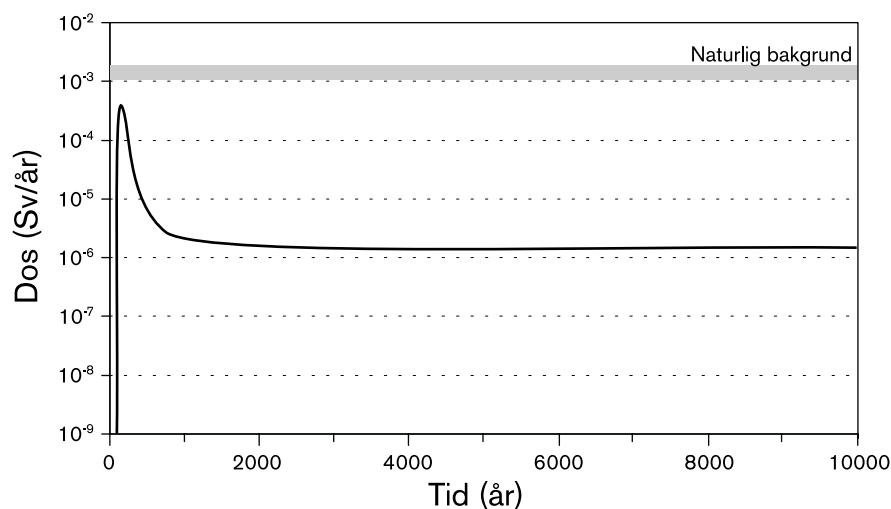
Figur 12-9. Risk för personer som borrar djupa borrhål som funktion av tid. Risken anges per borrhål.

Stråldos och risk för familjen

Dosen familjen som flyttar till platsen utsätts för beror på hur mycket radionuklider som kan transporteras upp till ytan genom det övergivna borrhålet, var familjen bor/befinner sig i förhållande till borrhålet, samt vad de äter. Hur mycket radionuklider som kan transporteras upp till ytan beror dels på hur mycket vatten som flödar förbi den genomborrade kapseln, dels på hur fort det kontaminerade vattnet kan transporteras upp till ytan. Ett borrhål kan, om det passerar vattenförande zoner, medföra att flödet på förvarsdjup ökar relativt de ostörda förhållandena. Här har det specifika grundvattenflödet på förvarsdjup satts till 10^{-1} m/s. Det är ett högt flöde, och motsvarar Data-rapportens värde för det största flödet på förvarsdjup vid Aberg. Kapseln har helt mist sin isolerande förmåga. Bufferten antas svälla igen efter genomborringen. Den har förlorat en del av sin volym och har därmed ett lägre svälltryck än tidigare, trots det bevaras dess förmåga att fördröja radionuklidtransport. Radionukliderna som kan transporteras ut genom den skadade kapseln och bufferten med det angivna flödet antas direkt föras upp till ytan. Då familjen kommer till platsen antas de spår borringen lämnat i naturen ha vuxit igen, och borrhålet upptäcks inte. Familjen antas driva ett självförsörjande jordbruk på platsen.

Det typekosystem som använts vid beräkningen av den potentiella dosen till individer i familjen är torvmosse, se avsnitt 9.9.2. I detta typekosystem antas nukliderna ha ackumulerats i torv under så lång tid att en konstant nivå finns i torven. Om den konstanta nivån inte hunnit uppnås innan familjen bosätter sig på platsen innebär det att dosen från vissa radionuklider kommer att överskattas. Familjen antas nyttja den kontaminerade marken i sitt jordbruk. Dosen till individer i familjen redovisas i figur 12-10. Dosen når inte upp till den naturliga bakgrundsstrålningen.

Den accepterade risken av 10^{-6} motsvarar en årsdos av $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv/år förutsatt att sannolikheten för exponering är 1. Denna dos kan enligt det föregående överskridas i perioden 100 till cirka 400 år efter förvaret stängts. Efter 400 år är den uppskattade årliga dosen till individer i familjen mindre än den accepterade. Hur stor är då sannolikheten att familjen exponeras, dvs att det verkligen finns ett borrhål på platsen då familjen flyttar dit? Sannolikheten att borra ett (1) borrhål som penetrerar en kapsel har



Figur 12-10. Dos till individer i en familj som bosätter sig invid ett borrhål, som borrar genom en kapsel och sedan övergivits, som funktion av tid.

uppskattats till 10^{-7} , sannolikheten att man någon gång borrar genom en kapsel är direkt proportionell mot antalet hål man borrar, dvs borrar man två hål är sannolikheten $2 \cdot 10^{-7}$, borrar man hundra är den $1 \cdot 10^{-5}$ osv. Det krävs således att man borrar tio miljoner borrhål till minst 500 meters djup innan familjen bosätter sig på platsen. Detta ska inträffa före eller under den period då den acceptabla dosen kan överskridas, dvs inom 400 år efter förvaret stängts. Detta innebär, med dagens mått mätt, ett orimligt stort antal borrhål, minst 25 000 per år i Sverige (cirka 33 000 om man tar hänsyn till att sannolikheten för att förvaret glömts är noll de inledande hundra åren). Risker för individer i familjen borde således rimligen vara väsentligt mindre än 10^{-6} per år oavsett när de bosätter sig på platsen.

12.7 Sammanfattning

Koncentration och isolering av det använda kärnbränslet på en plats innebär att denna plats innehåller mer farligt material än andra platser med likartade naturliga förhållanden. För platsens framtida användning medför detta oundvikligen att vissa restriktioner drabbar även framtida människor. Detta är inget unikt i samhället. Det finns många exempel – städer, gruvor, hamnar, vattentäcker, soptippar, åkrar, bergtunnlar osv – som har kortare eller längre inverkan på möjlig/tillåten/lämplig användning av den ursprungliga naturliga platsen. Restriktionerna på en djupförvarsplats bör vara minimala med tanke på det långa tidsperspektivet. I princip ska platsen kunna användas till ”vad som helst”.

Principen att samla farligt avfall på en plats medför en risk för att människor kan komma att exponeras för en stor mängd av avfallet. Om framtida generationer glömmet förvaret och dess syfte kan de oavsiktligt komma att påverka det. I värsta fall leder den mänskliga påverkan till att isoleringen av avfallet bryts.

Mänsklig påverkan har beaktats vid utformningen av förvaret och vid platsvalet. Förvarsdjupet ska tillåta mänsklig aktivitet på och i mark nära jordytan vid förvaret, och även byggande av vissa berganläggningar av de slag som finns idag. Platsen är fri från vad som idag betraktas som naturresurser.

På grund av osäkerheter om människans och samhällets utveckling går det dock varken att garantera att mänsklig påverkan på förvaret inte kommer att ske, eller att beskriva hur den kan komma att gå till. Stora bergarbeten nära förvaret kan i kombination med naturliga processer komma att påverka de tekniska barriärernas funktion. Vid genomborring av en kapsel bryts isoleringen direkt.

Som en illustration har konsekvenserna av en ofrivillig genomborring av en kapsel utretts. Dos och risk för borrhälsarbetarna, samt för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede har utretts. Borrhälsarbetarna utsätts för de högst doserna. Genomförd borringen inom cirka 300 år efter det att förvaret förslutits kan dosen till borrhälsarbetarna väsentligt överskrida bakgrundsstrålningen och nå de nivåer som idag tillåts för personer i radiologiskt arbete. Eftersom sannolikheten att borra igenom en kapsel är låg – den uppskattas till 10^{-7} – blir den risk framtidens borrhälsarbetare utsätts för på grund av att djupförvaret byggts ändå mycket liten även om förvaret faller i glömska. Dosen till familjen blir lägre än till borrhälsarbetarna, den överskrider aldrig den naturliga bakgrundsstrålningen. Om man antar att det finns ett övergivet borrhål genom en kapsel på platsen då en familj flyttar dit, kan dosen till familjen överskrida acceptanskriteriet $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv per år upp till 400 år efter det förvaret förslutits. Baserat på den uppskattade sannolikheten att borra igenom en kapsel behövs det minst 25 000 borrhål per år till 500 meters djup för att risken skall uppgå till 10^{-6} per år. Detta är ett orimligt stort antal borrhål.

Genomgången av mänskliga aktiviteter som kan påverka förvarets funktion visar att borring av djupa hål, samt byggande av större berganläggningar inte är lämpligt vid förvaret. Det är möjligt att restriktionerna mot sådant användande av platsen en gång glöms bort eller överträds. Frågan blir då vilka konsekvenser som kan tillåtas. I det analyserade scenariot uppträder bergundersökarna oförsiktigt – mer oförsiktigt än vad man kan förvänta sig av dagens människor med tillgång till dagens teknik. De har dock ett visst ansvar för sina handlingar.

I ett långt tidsperspektiv kan förvarsplatsen komma att utnyttjas på ett sådant sätt att förvaret påverkas. Möjligheterna att bedöma de radiologiska konsekvenserna av detta är begränsade på grund av osäkerheter förknippade med människans och samhällets utveckling. I det analyserade scenariot exponeras de mest utsatta personerna för en stråldos motsvarande cirka 0,1–10 gånger den naturliga bakgrundsstrålningen. Sannolikheten för att exponering kommer att ske bedöms vara mycket liten varför risken för individer (såväl borrhälsarbetare som de vilka eventuellt bosätter sig på platsen efter en borring) är väsentligt mindre än 10^{-6} per år.

12.8 Referenser

Berglund L, 1999. Hagby Asahai, personlig kommunikation.

Bergström U, Edlund O, Nordlinder S, 1995. Human activities affecting the integrity of a deep geological repository for nuclear waste – Radiological risks from intrusion. SKB PR U-96-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

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.

OECD 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, Frankrike.

Ritchey T, 1997. Scenario Development and Risk Management using Morphological Field Analysis. Proceedings of the 5th European Conference on Information Systems. Cork.

SKB, 1995. SR 95 – Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wuschke D M, 1996. Assessment of the Long-Term Risks of Inadvertent Human Intrusion into a Proposed Canadian Nuclear Fuel Waste Disposal Vault in Deep Plutonic Rock – Revision 1. AECL-10279 Rev 1, COG-92-151 Rev 1.

Nebot J, Jordi B, 1991. The implications of soil acidification on a future HLW repository. Part I: The effects of increased weathering, erosion and deforestation. SKB TR 91-45. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wersin P, Jordi B, Laaksoharju M, 1994. The implications of soil acidification on a future HLW repository. Part II: Influence on deep granitic groundwater. The Klipperås study site as test case. SKB TR 94-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

13 Diskussion och slutsatser

Syftet med SR 97 formulerades i inledningen som fyra punkter:

1. SR 97 ska ge underlag för att påvisa möjligheten att finna en plats i svensk berggrund där KBS 3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter.
2. SR 97 ska demonstrera metodik för säkerhetsanalys.
3. SR 97 ska ge underlag för att precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar och för att härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning.
4. SR 97 ska ge underlag för att härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.

I detta kapitel diskuteras var och en av punkterna följt av en redovisning av hur erfarenheterna från SR 97 kan användas till att bl a prioritera forskningsinsatser. Kapitlet avslutas med några korta ord som sätter SR 97 i dess sammanhang inom SKB:s lokaliseringsprogram.

13.1 KBS-3-metodens säkerhet i svensk berggrund

Säkerhetsanalysen utgår från förvarssystemets utseende efter förslutning och analyserar hur förvaret kan förändras över tiden. Tre fiktiva förvar baserade på data från tre verkliga platser analyseras för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund. Långsiktiga förändringar analyseras genom en uppdelning i inre processer i förvarssystemet och yttre påverkan från omgivningen. Olika förhållanden initialt och i omgivningen ger en uppsättning scenarier för vilka förvarets utveckling analyseras kvantitativt. En bedömning av analysens resultat rymmer såväl kvalitativa som kvantitativa frågor:

- Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade?
- Vilka är resultaten av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas?
- Hur bör resultaten av scenarioanalyserna vägas samman till en total riskbedömning?
- Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar?

De tre första frågorna följer ur metodiken för säkerhetsanalysen, den sista rör ett specifikt syfte med SR 97.

13.1.1 Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade?

Identifiering av inre processer och yttre skeenden av vikt för förvarets långsiktiga utveckling och säkerhet har pågått i flera decennier, i Sverige och i andra länder. Arbetet finns dokumenterat i rader av rapporter och databaser. SKB har en egen databas som ständigt underhålls och kompletteras med bl a internationella erfarenheter. Det senaste decenniet har mycket få nya processer av vikt identifierats. Förvarets uppbyggnad med flera barriärer med delvis redundanta funktioner gör också att känsligheten minskar för en eventuell oidentifierad process.

Scenarievalet i SR 97 är en expertbedömning, grundad på erfarenheter från tidigare analyser, tillgängliga databaser etc. En jämförelse med säkerhetsanalyser i andra länder visar att den uppsättning scenarier som analyseras i SR 97 stämmer väl med andra analyser.

Tilltron till att allt viktigt finns med måste bedömas utifrån de ansträngningar som gjorts för att nå fullständighet och utifrån expertkunskap om förvarssystemet och omgivningens natur.

SKB bedömer att de inre processer och den uppsättning scenarier som analyseras i SR 97 är tillräckliga för att ge god tilltro till säkerhetsanalysens resultat.

13.1.2 Vilket är resultatet av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas?

I SR 97 analyseras:

- Ett basscenario där förvaret tänks vara byggt enligt specifikationer, där inga kapslar har initiala fel och där dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå.
- Ett kapseldefektscenario som skiljer sig från basscenarioet genom att ett fåtal kapslar tänks vara behäftade med initiala fel.
- Ett klimatscenario som behandlar framtida klimatförändringar.
- Ett jordskalvsscenario.
- Ett scenario som behandlar framtida mänskliga handlingar som kan tänkas påverka djupförvaret.

Basscenarioet

I basscenarioet analyseras förvarets isolerande funktion under förutsättning att dagens klimat består. Den övergripande slutsatsen är att kapseln behåller sin isolerande förmåga till och med i ett miljonårsperspektiv. Därmed sker inga utsläpp av radioaktiva ämnen från förvaret. Buffertens långsiktiga funktion och berggrundens långsiktiga stabilitet är viktiga frågor i basscenarioet. För båda analyseras konsekvenserna av alla kända termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer av vikt. Modellstudier och pessimistiska överslagsberäkningar visar att bufferten kan förväntas behålla sin funktion i ett miljonårsperspektiv. På samma sätt visas att geosfären, och särskilt den bergvolym som utnyttjas för deponering, kan förväntas vara stabil över mycket lång tid.

Utvecklingen i buffert och geosfär ger förutsättningar för att kvantifiera den termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska miljön för kapseln. Baserat på detta bedöms kapselns isolering behållas mycket länge. De beräknade säkerhetsmarginalerna mot både mekaniska och kemiska påfrestningar i basscenariot är stora även i ett miljonårsperspektiv.

Analysen förutsätter att temperaturen på kapselytan inte överstiger 100 °C och att vattnet på försvarsdjup är syrefritt. Det förra kan alltid uppnås med en lämplig utplacering av deponeringshål. Omfattande provtagning visar på syrefria förhållanden i grundvattnet på djup större än hundra meter. Att syrefria förhållanden råder på försvarsdjup säkerställs i regel av biologiska processer redan i markskiktet vid grundvattenbildning, dessutom finns en mycket stor potential för syreförbrukning i bl a geosfärens mineral.

Den grundläggande förståelsen för inblandade processer och tilltron till modeller och data diskuteras systematiskt i Processrapporten och i samband med de specifika analyserna i basscenariot. Processförståelse och tilltro kan generellt sägas vara god. De flesta processerna är väl kända och studerade av naturvetenskapen i många decennier. Modeller och data är tillräckligt tillförlitliga för de ofta grova uppskattningar som krävs för att sätta pessimistiska gränser för utvecklingen i basscenariot.

Resultatet av basscenariot är delvis en konsekvens av de säkerhetsprinciper som legat till grund för försvarsutformningen. Koppars är stabilt i förvarets syrefria miljö. Bufferten består av en naturlig lera som hämtats från en geologisk miljö där den var stabil i flera miljoner år. Den svenska berggrunden har varit stabil i ett ännu längre perspektiv.

Kapseldefektscenariot

I kapseldefektscenariot analyseras utvecklingen i en initialt defekt kapsel och den radionuklidspredning som kan bli följden i buffert, geosfär och biosfär. Resultatet blir uppskattningar av dos och risk som kan jämföras med acceptanskriteriet för ett djupförvar.

Den övergripande slutsatsen är att förvaren vid Aberg, Beberg och Ceberg uppfyller acceptanskraven för ett djupförvar. Riskberäkningarna är utformade för att säkert inte underskatta risken.

I avsnitt 13.1.4 nedan diskuteras riskberäkningarna för de tre platserna mer ingående.

Tilltro till data: Osäkerheter i indata till beräkningar av radionuklidtransport har hanterats rigoröst och så långt möjligt på ett enhetligt sätt för alla data. Informationen om osäkerheterna används för att formulera riskberäkningar men också till att värdera olika faktorer betydelse för beräkningsresultatet. Värderingen ligger till grund för en bedömning av områden där ytterligare forskning kan ge förbättrade kunskaper av värde för säkerhetsanalysen:

- radionuklidomsättning i biosfär,
- bränsleupplösning,
- hydraulisk beskrivning i deponeringshålsskala.

Tilltro till modeller: Kvantifieringen av radionuklidtransport ger det riskmått som direkt jämförs med Strålskyddsinstitutets acceptanskrav. En värdering av tilltron till modellerna för radionuklidtransport är därför viktig.

Kravet på tilltron till en modell måste ställas i relation till användningens syfte. För en säkerhetsanalys är det framför allt viktigt att visa tilltron till att modellerna inte underskattar konsekvenserna.

För grundvattenflöde finns flera olika modellkoncept och i SR 97 jämförs tre olika koncept. Slutsatserna av jämförelsen är att den naturliga variabiliteten hos indata till modellerna påverkar resultatet mer än valet av modell.

Tilltron till modellerna för radionuklidtransport i kapsel, buffert och geosfär bedöms vara tillräcklig. Många grundläggande processer som diffusion och advektion kan ges tillförlitliga matematiska behandlingar i modellerna. Konsekvensen av andra processer, t ex korrosion av kapslingsrör, förenklas genom pessimistiska antaganden. Åter andra, t ex ytdiffusion, hanteras förenklat genom pessimistiska data. Biosfärmodellen innehåller grova pessimistiska förenklingar särskilt för torvekosystemet som ger de största konsekvenserna.

Klimatscenariot

I klimatscenariot utreds konsekvensen av framtida klimatförändringar. Kallare klimat är med stor sannolikhet att förväntas men tidpunkter för omfattande förändringar och storleken av dessa är svåra att förutse. Situationen hanteras i SR 97 med att måla upp en framtida klimatutveckling där huvuddragen styrs av kända astronomiska skeenden, men där den kvantitativa påverkan på förvarssystemet under olika tidsperioder omgärdas av större osäkerheter. Utvecklingen som skisseras omfattar ett stort spann av olika klimatförhållanden. Även om detaljer i utvecklingen aldrig kommer att kunna förutses är tilltron god till att de analyserade förhållandena tillsammans täcker in möjliga klimatförändringar i ett hundrausenårigt perspektiv.

Analysen förenklas avsevärt av att de omfattande klimatrelaterade förändringarna på ytan vid de tre förvarsplatserna bara ger begränsade förändringar på förvarsdjup. Detta möjliggör också formen för analys av konsekvenserna av klimatförändringar, nämligen som en jämförelse med förvarsförhållanden i basscenariot där dagens klimat antas bestå.

Den övergripande slutsatsen av klimatscenariot är att utvecklingen inte leder till att intakta kapslar skadas. Dessutom är den samlade effekten av förändringarna i klimatscenariot på radionuklidtransportprocesser sådan att konsekvenserna i form av doser förväntas bli mindre än i kapseldefektscenariot.

Isolering: Slutsatsen att kapseln förblir intakt nås väsentligen genom att gränssätta de förändringar i temperatur och bergspänningar samt i grundvattnets sammansättning, tryck och flöde som klimatförändringarna orsakar på förvarsdjup. Grundvattentrycket kan gränssättas genom att uppskatta den maximala istjockleken ovan förvaret. För grundvattensammansättningen finns anledning att vänta förändringar i salthalt medan syrehaltigt vatten inte förväntas tränga ner till förvarsdjup annat än möjligtvis under mycket begränsade perioder. Förändringar i bergspänningar kan också gränssättas baserat på istäckets tyngd. Bergspänningarna ger inte deformationer som skadar kapslarna.

Tilltron till att kommande förändringar i förvarssystemet vad gäller isolering ligger inom de uppskattade gränserna är god.

Fördröjning: Klimatförändringar ger också ändrade transportförhållanden för radionuklider i buffert och framför allt geosfär. Förändringarna av transportdata ligger nästan alltid inom ramen för de data som används i kapseldefektscenariot.

Biosfär: Den viktigaste förändringen ligger i en kraftig minskning av konsekvenserna i biosfären eftersom förvarsplatserna är täckta av is eller vatten under övervägande delen av perioden med kallare klimat. Konsekvenserna av initialt skadade kapslar blir därmed **mindre** än i kapseldefektscenariot.

Jämfört med de extrema följdverkningar en nordeuropeisk glaciation har på mänsklighetens livsbetingelser synes effekterna av ett djupförvar på människa och natur vara försumbara.

Jordskalvs/tektonikscenariot

I SR 97 introduceras en ny metod för att analysera konsekvenserna av jordskalv med platspecifika data, både vad gäller geosfärens spricksystem och frekvenser och magnituder av jordskalv. Metoden utgör ett första steg i utvecklingen av ett framtida tillvägagångssätt för kvantitativ analys av jordskalvsscenarioer, och innehåller ännu några kraftigt pessimistiska förenklingar. Ändå visar beräkningar redan med denna förenklade modell att sannolikheten för kapselskador under en period av 100 000 år är av samma storleksordning som den som antagits för initiala kapselskador, dvs bråkdelar av en procent av kapslarna berörs.

De pessimistiska antaganden som görs i riskanalysen bedöms med god marginal kunna kompensera för bl a de osäkerheter som har att göra med prediktionen av framtida jordskalv. Risker för kapselskador orsakade av jordskalv framstår därför som försumbara.

Intrångsscenarioer

Listan över mänskliga handlingar som kan påverka förhållandena på en förvaringsplats kan göras lång. Eftersom samhällets och människans utveckling i princip är oförutsägbar kan listan aldrig göras komplett. Med hänvisning till varje generations rätt att själv få välja hur man ska handla under olika förhållanden och deras skyldighet att ta det fulla ansvaret för sina egna handlingar, har det etablerats en praxis att säkerhetsanalysen bara ska hantera oavsiktliga framtida handlingar som kan störa förvaret.

Möjligheterna att kvantifiera riskerna med att människor i framtiden påverkar förvaret är starkt begränsade. Det är inte heller klarlagt på vilket sätt hänsyn till sådana risker ska tas i den totala bedömningen av acceptansen för ett djupförvar.

För att minska sannolikheten för att människans handlingar oavsiktligt ska påverka förvarets säkerhet tar platsvalsprocessen hänsyn till att olika områden kan ha olika potential för alternativa användningar, t ex för brytning av malmer eller ovanliga mineral. Förvarsdjupet är dessutom ett sätt att undvika både ytliga naturliga störningar och effekter av människans verksamhet.

Sannolikheten för att oavsiktliga handlingar ska störa förvaret kan också påverkas av längden på perioden av institutionell kontroll över förvarsområdet och av hur kunskapen om förvaret kan bevaras för framtiden. Alla analyser av sådana faktorer över mer än ett fåtal hundra år hamnar dock i svårigheten att bedöma hur samhället kommer att utvecklas. En specifik fråga gäller risken för kollaps av samhället med åtföljande förlust av kunskaper och teknisk kompetens.

Frågan om hur eventuella effekter av människors handlingar ska värderas, och vilket ansvar vi idag har för att gardera oss mot en samhällskollaps, har starka inslag av etiska värderingar. En grundläggande utgångspunkt är värderingen att säkerheten bäst gynnas av att det radioaktiva avfallet inte sprids ut, utan placeras i avgränsade förvar.

I SR 97 diskuteras hur tänkbara samhällsutvecklingar och framtida mänskliga handlingar som rör förvaret i någon mån kan kategoriseras och uttryckas som olika scenarier.

I ett illustrerande exempel analyseras en situation där en kapsel i förvaret oavsiktligt penetreras av bergborrhare. Dos och risk beräknas för borrharepersonal och för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede. Borrharepersonalen kan komma att utsättas för de högsta doserna men risken för både borrharepersonal och familj bedöms ligga långt under acceptanskriteriet, 10^{-6} /år, eftersom sannolikheten för de analyserade händelserna uppskattas vara mycket små.

13.1.3 Sammanvägning av scenarioanalyserna

Total riskbedömning

Den totala risken från ett djupförvar är en summering av riskerna förknippade med alla framtida utvecklingar förvaret kan tänkas genomgå.

I en strikt genomförd riskberäkning ska sannolikheten för varje tänkbar utvecklingsväg uppskattas och multipliceras med den beräknade konsekvensen. Summan av alla sådana delrisker blir den totala risken som jämförs med Strålskyddsinstitutets acceptanskriterium.

Sådana strikta sannolikhetsuppskattningar kan inte göras för ett komplext system som ett djupförvar, för vilket utvecklingen ska analyseras hundratusentals år in i framtiden. Den gängse metoden, som också tillämpas i SR 97, är i stället att samla en rad tänkbara utvecklingsvägar med gemensamma huvuddrag i en uppsättning scenarier. Sannolikheten för varje scenario kan sedan uppskattas eller gränssättas uppåt.

Med de scenariodefinitioner som gäller i SR 97 bör rimligen konsekvenserna av kapseldefekt- och jordskalvsscenarioerna adderas till dem för basscenariot utan vikt faktorer. Kapseldefekt- och jordskalvsscenarioerna innehåller i sig sannolikhetsfaktorer i form av frekvens för initiala respektive jordskalvsinducerade kapselskador. Båda dessa faktorer har definitionsmässigt uteslutits ur basscenariot.

Inom klimatscenariot diskuteras effekterna av initiala kapselskador och till detta scenario bör även läggas sannolikheten för jordskalvsinducerade skador.

Situationen kompliceras av att man med dagens kunskap inte kan avgöra vilken andel av jordskalvsstatistiken i jordskalvsscenarioet som orsakas av kvardröjande effekter av tidigare klimatförändringar och vilken andel som har andra orsaker. Därför adderas alla konsekvenser av jordskalvsscenarioet till både bas- och klimatscenarierna.

Resultatet blir då två ”superscenarier” där olika effekter adderas. Det ena beskriver utvecklingen då dagens klimatförhållanden består, och inkluderar både initiala kapselskador och jordskalv. Det andra beskriver utvecklingen vid klimatförändringar, med initiala kapselskador och jordskalv. Det senare måste betraktas som en betydligt mer sannolik utveckling än det förra, eftersom klimatförändringar med stor sannolikhet är att förvänta.

I SR 97 har konsekvenser bara beräknats i kapseldefekt- och klimatscenerierna. I basscenariot uppkommer inga radiologiska konsekvenser och inte heller jordskalvs-scenariot där analysen är preliminär, förväntas med förfinade analyser och/eller lämplig förvarsutformning, ge några konsekvenser. Därmed blir den samlade risken förknippad med förvaret en sammanvägning av riskerna i kapseldefekt- och klimatscenerierna. Risken i kapseldefektscenariot beräknas för de flesta epoker bli betydligt större än risken i klimatscenariot där biosfärsförhållandena ofta ger en kraftig utspädning.

Därför uppskattas i SR 97 pessimistiskt den samlade risken förknippad med förvaret vara lika med den beräknade risken i kapseldefektscenariot.

Enligt Strålskyddsinstitutet kan konsekvenser förknippade med intrångsscenerier bedömas separat från övriga scenarier och intrångsscenerierna har därför inte inkluderats i resonemanget ovan.

Generell bedömning av KBS 3-metodens säkerhet

I SR 97 har en fördjupad granskning och integrerad redovisning av den långsiktiga säkerheten för KBS 3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle genomförts. Resultaten bekräftar den tidigare bilden att ett väl utformat förvar placerat i berg med egenskaper som inte väsentligen skiljer sig från svenskt normalberg har goda förutsättningar att med marginal klara myndigheternas säkerhetskrav.

KBS 3-systemet har en flexibilitet vad gäller förläggningsdjup och utformning som tillåter anpassning till platsspecifika förhållanden, och till den information om bergförhållanden som fortlöpande insamlas under platsundersökningar och utbyggnad.

SKB bedömer att förvarsutformningen som analyseras i SR 97 nått en tillräcklig mognad, att den generella förståelsen för förvarets långsiktiga funktion är tillräckligt god, och att potentialen till hög säkerhet har tillräckliga marginaler för att utgöra en tillfredsställande grund för att genomföra platsundersökningar.

13.1.4 Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar?

I SR 97 analyseras tre platser för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund vad gäller geologi, grundvattenomsättning, vattenkemi, närhet till kust, nordlig eller sydlig förläggning, omgivande biosfär etc.

Ur resultaten av de olika scenarioanalyserna kan en mängd information hämtas för att illustrera betydelsen av varierande förhållanden.

Långsiktig säkerhet, isolering

Basscenariot: I basscenariot är säkerhetsmarginalerna vad gäller isolering mycket stora för alla platser. Det gäller såväl mekaniska som kemiska påfrestningar på kapseln. Grundvattensammansättning varierar något mellan platserna men skillnaderna är betydelselösa vad gäller t ex kopparkorrosion. Platsspecifika bergmekaniska analyser har inte genomförts utan konsekvenserna av den mekaniska utvecklingen på geosfärens stabilitet kring förvaret gränssätts med generella och mycket pessimistiska överslag.

Klimatscenariot: Osäkerheterna är stora om de detaljerade utvecklingarna vid platserna, men säkrare uttalanden kan göras om skillnader mellan platserna. Av betydelse för isoleringen är framför allt istäckets mäktighet vid en glaciation. Det tjockaste istäcket förväntas vid Ceberg, där isen också ligger kvar längst. Detta gör att också de mekaniska påfrestningarna på kapseln, både till följd av ökat grundvattentryck och mekanisk belastning på bergrunden blir störst vid Ceberg och minst vid Aberg. Förändringar i grundvattensammansättningen i klimatscenariot bedöms inte ge några platsspecifika skillnader som har betydelse för isoleringen.

Jordskalv: Vad gäller sannolikheterna för jordskalvsinducerade kapselskador ger beräkningar värden som är små och likvärdiga vid de tre platserna. Beräkningarna har i SR 97 gjorts med pessimistiska antaganden som kraftigt påverkar resultatet. Det är därför vanskligt att dra några slutsatser om platsernas relativa lämplighet vad gäller jordskalv. Dessutom kan jordskalvsrisken reduceras genom att ta en större del av berget i anspråk för förvaret. Därmed skulle en eventuell skillnad vad gäller jordskalvsrisker snarare få ekonomiska än säkerhetsmässiga konsekvenser. Skillnader mellan platserna orsakas av skillnader i den lokala sprickstrukturen i kombination med den valda förvarsinläggningen samt av skillnader i regional jordskalvsstatistik. Skolvstatistiken utgör en av de största osäkerheterna i analysen av jordskalv.

Sammanfattning, isolering: Förhållandena vid såväl Aberg, Beberg som Ceberg ger mycket stora säkerhetsmarginaler för förvarets isolerande förmåga i basscenariot.

Även i klimatscenariot bedöms utvecklingen leda till att isoleringen bibehålls vid samtliga analyserade platser. Säkerhetsmarginalen till mekaniska kapselbrott bedöms här vara minst vid Ceberg och störst vid Aberg.

En preliminär bedömning är att ett säkert förvar vad avser jordskalv kan byggas vid de tre platserna med valda platsspecifika förvarsutformningar. Det är idag inte möjligt att göra några jämförelser av platserna i detta avseende.

Långsiktig säkerhet, utsläppskonsekvenser

Kapseldefekts scenariot: Beräkningarna i kapseldefekts scenariot (dagens klimatförhållanden) visar att Strålskyddsinstitutets acceptanskrav för ett djupförvar uppfylls med stor marginal för samtliga platser. Marginalen är minst för Aberg och störst för Ceberg. Skillnaden gäller framför allt för tiden efter 100 000 år. Riskberäkningarna har många pessimistiska inslag för att säkert inte underskatta risken.

Om utsläppet sker till en brunn blir risken vid Aberg mindre än en hundradel av acceptanskriteriet om beräkningen görs för en tidsperiod av en miljon år. Risken vid Beberg är cirka fem gånger lägre och vid Ceberg omkring tio gånger lägre än den vid Aberg.

Vid utsläpp till torvekossystem skiljer sig platserna ungefär på samma sätt för tider upp till omkring 100 000 år. I ett miljonårsperspektiv ökar sedan risken vid Aberg med ungefär en faktor 40, vid Beberg en faktor 10 och vid Ceberg marginellt. För tider över 100 000 år dominerar den naturliga radionukliden Ra-226 från bränslets uraninnehåll konsekvenserna för torvekosystemet.

Den beräknade retentionsförmågan är likvärdig vid de tre platserna för långlivade, icke sorberande nuklider. För sorberande nuklider är retentionen starkast vid Ceberg och svagast vid Aberg.

Skillnaderna beror i första hand på skilda hydrauliska genomsläppligheter. Bergmassan i Aberg och Beberg är t ex cirka 100 gånger mer genomsläpplig än den i Ceberg med reservation för att också undersökningsmetodiken skiljer sig mellan platserna.

Klimatscenariot: Den stora skillnaden mellan kapseldefektscenariot och klimatscenariot vad gäller konsekvenserna av utsläpp av radionuklider ligger i de förändrade och gynnsammare biosfärsförhållandena. Samtliga förvarsplatser förväntas vara täckta av is eller hav under stora delar av en kommande hundratusenårsperiod. Biosfärsförhållande bedöms bli mest gynnsamma vid Aberg som förväntas vara havstäckt under större delen av perioden. Ceberg gynnas minst av klimatförändringarna men även här bedöms konsekvenserna av ett radionuklidutsläpp bli betydligt mindre än i kapseldefektscenariot.

Jordskalv: Utvärderingen av analysen av jordskalvsscenario tyder på att sannolikheten för att få jordskalvsinducerade kapselskador är mycket liten. Därför analyseras inte utsläppskonsekvenser för detta scenario.

Sammanfattning, utsläppskonsekvenser: Också ur denna aspekt bedöms ett med stora marginaler säkert förvar kunna byggas vid samtliga platser. Den sämre retentionen vid Aberg kompenseras av den gynnsammare biosfärsutvecklingen vid platsen. Det är inte meningsfullt att gradera platserna vad avser konsekvenserna av radionuklidutsläpp.

Termiska förhållanden

De termiska förhållandena skiljer något mellan platserna vad gäller temperatur på förvarsdjup och värmeledningsförmåga i berget. De plats-specifika termiska förhållandena bestämmer tillsammans med sprickstrukturen hur stor del av förvarsberget som måste tas i anspråk för att hysa en given mängd bränsle. Det styrande kriteriet är att temperaturen på kopparkapselns yta inte får överstiga 100 °C.

Vid Aberg har de termiska förhållandena i kombination med ett relativt begränsat undersökningsområde lett till att en förvarsutformning i två plan föreslagits, medan enplansförvar föreslås i Beberg och Ceberg.

Skillnaderna i termiska förhållanden har i första hand ekonomisk betydelse eftersom det termiska kriteriet alltid kan uppfyllas om en tillräcklig bergvolym tas i anspråk.

Slutsats

I sammanfattning bedöms att ett säkert djupförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden kan byggas vid en plats där förhållandena liknar dem vid såväl Aberg, Beberg som Ceberg.

Säkerhetsmarginalerna beräknas bli stora vid samtliga platser. SR 97 har inte givit underlag för att tillmäta skillnader i den långsiktiga säkerheten mellan de tre platserna någon avgörande betydelse vid en tänkt sammanvägning av alla de faktorer som påverkar lokaliseringen av ett djupförvar i den långsiktiga säkerheten. Dessa rör t ex teknik, ekonomi, användning av mark, ingrepp i miljö och konsekvenser för samhället.

13.2 Metodik för säkerhetsanalys

Enligt metodikbeskrivningen i kapitel 4 kan analysen beskrivas i fem moment:

- systembeskrivning,
- beskrivning av initialtillstånd,
- val av scenarier,
- analys av scenarier,
- utvärdering.

I SR 97 har flera nya inslag i metodiken provats. Metodiken för de fyra första momenten, liksom hanteringen av osäkerheter diskuteras nedan.

13.2.1 Systembeskrivning

Systembeskrivningen ger en struktur för att beskriva förvarssystemets tillstånd i tid och rum och de processer som över tiden kan förändra detta tillstånd. Med SR 97 introduceras THMC-strukturen för systembeskrivningen.

Formatet för beskrivningen ger en mer renodlad bild av de processer som styr utvecklingen än tidigare beskrivningar som utnyttjat interaktionsmatriser.

En annan viktig fördel är att samma format kan användas i de efterföljande scenarioanalyserna där beskrivningen av utvecklingen genomförs som delvis kopplade termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska delutvecklingar. Med tidigare beskrivningar har det varit svårt att överskådligt visa hur informationen i systembeskrivningen överförs till scenarioanalyserna.

Metodiken i SR 97 är processororienterad och detta understryks av att Processrapporten utgör en hörnsten i systembeskrivningen och därmed också i underlaget för de efterföljande analyserna. I Processrapporten beskrivs alla processer enligt samma format. Erfarenheterna av den första versionen av Processrapporten som används i SR 97 är goda. Angreppssättet har tvingat fram en tydligare redovisning av kunskapsunderlag och möjligheten till kvantifiering för olika processer. Processrapporten behöver genomarbetas inför varje kommande analys.

I systembeskrivningen fastläggs också en rad variabler som visar förvarssystemets tillstånd över tiden. Detta ger en struktur för att beskriva systemets initiala tillstånd som är analysens utgångspunkt. Osäkerheter i initialtillståndet kan därmed studeras systematiskt och bidra till underlaget för val av scenarier.

Variabelindelningen bör också kunna användas för att ge en striktare beskrivning av förvarssystemets utveckling i tiden i kommande säkerhetsanalyser.

Till systembeskrivningen hör också arbetet med att identifiera inre processer och yttre förhållanden som har betydelse för utvecklingen. Slutsatser kring detta finns i avsnitt 13.1.1 ovan.

13.2.2 Val av scenarier

Valet av scenarier i SR 97 är en expertbedömning baserad på tidigare erfarenheter, innehållet i tillgängliga databaser, scenarieval i systerorganisationers säkerhetsanalyser etc. Valet behöver revideras inför kommande analyser men bedöms inte leda till att uppsättningen förändras på något avgörande sätt. En tydligare koppling mellan systembeskrivning, scenarioval och informationsdatabaser bör också göras. Scenariovalet kommer med nödvändighet även i efterföljande analyser ha inslag av expertbedömningar.

I SR 97 är grunden ett basscenario där dagens förhållanden i omgivningen tänkts bestå, trots att klimatförändringar med stor sannolikhet kan förväntas, åtminstone i ett tiotusenårigt perspektiv. Skälet till detta val av basscenario är framför allt att göra en tydlig åtskillnad mellan förändringar orsakade av inre processer i förvaret och sådana som orsakas av växelverkan med en föränderlig omgivning. Dessutom krävs i Strålskydds-institutets föreskrifter uttryckligt att ett fall där dagens förhållanden består ska analyseras. Valet av basscenario i SR 97 kommenteras också under nästa punkt.

Grunden för bedömningen av sannolikheter för att olika scenarier ska bli verklighet är svag. Grova, pessimistiska uppskattningar liknande dem i avsnitt 13.1.3 bedöms bli nödvändiga även i kommande analyser.

13.2.3 Analys av valda scenarier

Ramarna för scenarioanalyserna i SR 97 ges av det initialtillstånd och de omgivningsförhållanden som definieras i respektive scenario. Med dessa förutsättningar analyseras förvarets utveckling till följd av de inre processerna och växelverkan med omgivningen. THMC-formatet har gjort det möjligt att visa hur det komplexa systemet av processer kan lösas upp i huvudsakligen en termisk, en hydraulisk, en mekanisk och en kemisk utveckling med några väsentliga kopplingar dem emellan. Formatet för systembeskrivningen gör det också möjligt att visa hur processer systematiskt hanteras i analyserna.

Scenarioanalyserna utgår från ett basscenario. Utvecklingen i övriga scenarier jämförs sedan med den i basscenariot. Metoden har varit värdefull, speciellt i analysen av kapseldefekt- och klimatscenarierna. Effekter och osäkerheter orsakade av inre processer kan skiljas från sådana som orsakas av yttre förändringar. Metoden är också naturlig eftersom förvarssystemet är konstruerat för att vara robust: Förvarets funktion ska inte allvarligt påverkas av de förändringar som kan förväntas i omgivningen.

Scenarioanalyserna görs till stor del med modellberäkningar. SKB har tillgång till en stor uppsättning modellverktyg för bl a termiska beräkningar, beräkningar av grundvattenflöde, kemisk utveckling i grundvatten och buffert, och radionuklidspridning i närområde, geosfär och biosfär. Modellerna utvecklas fortlöpande efter behov. Probabilistiska beräkningar har utnyttjats på flera sätt för analyserna i SR 97.

13.2.4 Hantering av osäkerheter

Hantering av kvalitativa och kvantitativa osäkerheter är ett viktigt inslag som berör alla moment i en säkerhetsanalys. Tabell 4-1 i avsnitt 4.6 visar hur osäkerheter hanteras i SR 97.

Fullständighet

Frågan om fullständighet i processidentifiering och scenarieval kommenteras i avsnitt 13.1.1.

Konceptuell osäkerhet; processförståelse och modellosäkerhet

Det som ofta benämns konceptuell osäkerhet, med något varierande innebörd i olika sammanhang, har i SR 97 delats in i begreppen ”grundläggande processförståelse” och ”modellosäkerhet”. Med det förra avses den vetenskapliga förståelsen av en process, med det senare de osäkerheter som tillkommer då en process analyseras med en matematiskt modell i en säkerhetsanalys.

Osäkerheter kring den grundläggande förståelsen för olika processer diskuteras i Processrapporten. Det enhetliga formatet för processbeskrivningarna har varit värdefullt för redovisningen av osäkerheter och beskrivningarna kan utvecklas ytterligare i kommande versioner av Processrapporten.

Modellosäkerheter diskuteras där modelleringar förekommer i scenarioanalyserna. Även detta kan i allmänhet genomföras mer systematiskt till kommande analyser. För de viktiga modeller som används vid kvantifiering av radionuklidtransport är hanteringen mer utvecklad. Tre olika konceptuella modeller för grundvattenflöde används med det viktiga resultatet att skillnaderna i förutsägelserna är små jämfört med framför allt den naturliga variabiliteten i berggrunden. Tilltro till modellerna för grundvattenflöde och för radionuklidtransport i närzon och geosfär diskuteras mer ingående. Tilltron till att modellerna inte underskattar konsekvenserna bedöms som god.

Indata

Osäkerheter i indata diskuteras där modelleringar förekommer. Även här är metodiken mest utvecklad för data till radionuklidtransportberäkningar. Alla dessa data finns sammanställda i en egen Datarapport. Metoden att välja rimliga och pessimistiska värden för samtliga data och sedan använda dessa i både probabilistiska och icke probabilistiska analyser har fungerat väl. Bl a har inverkan av olika parametrar på förvarets fördröjande funktion systematiskt kunnat studeras. Metoden för probabilistiska beräkningar visar en framkomlig väg för att genomföra probabilistiska analyser där underlag i form av statistiska data saknas. Metoden är ny och behöver utvärderas inför kommande analyser.

Sammanfattning

De metoder som prövats för hanteringen av osäkerheter i SR 97 har vid den praktiska tillämpningen visat sig användbara. Tillämpningen av metoden kan utvecklas i kommande analyser. De nya metoder som införts för redovisning och hantering av dataosäkerheter för kvantifieringen av radionuklidtransport bedöms kunna utgöra grunden också för kommande redovisningar.

13.2.5 Bedömning av tillgänglig metodik

SKB bedömer med stöd i redovisningen ovan att den metodik som använts i SR 97 utgör en tillräcklig grund inför kommande säkerhetsanalyser baserade på data från platsundersökningar.

13.3 Underlag för platsval och platsundersökningar

SR 97 utgör ett viktigt underlag till ett pågående arbete med syfte att formulera och kvantifiera krav och önskemål som djupförvaret ställer på berget utifrån bl a perspektivet långsiktig säkerhet. Erfarenheter från SR 97 används också i arbetet med att formulera ett samlat program för undersökning och utvärdering av platser.

13.3.1 Vilka krav ställer djupförvaret på berget?

SKB har bedrivit arbetet med att formulera och kvantifiera krav och önskemål på berget parallellt med SR 97. Arbetet kommer att redovisas under år 2000, och en lägesredovisning gjordes i samband med redovisningen av FUD-program 98. Projektet identifierar s k geovetenskapliga lämplighetsindikatorer utifrån en analys av vilka krav och önskemål som kan ställas på förhållanden i berget och bergets egenskaper. Kraven kan ställas både med hänsyn till långsiktig säkerhet och för att det ska vara tekniskt möjligt att bygga förvaret. Bedömningarna av vad som är väsentligt ur perspektivet långsiktig säkerhet bygger på tidigare kunskaper och erfarenheter och på de analyser som genomförts inom ramen för SR 97.

Ett första steg av arbetet bestod i att bestämma vilken geovetenskaplig information som används i säkerhets- och bygganalys. En sådan inventering redovisades 1996 och har nu stämts av mot den mer omfattande analys som gjorts inom SR 97. I en säkerhetsanalys är det främst informationen om initialtillståndet som måste hämtas från platsspecifika undersökningar.

Eftersom djupförvarets samlade funktion i olika tidsepoker beror på en stor mängd samverkande processer är det svårt att specificera mer detaljerade krav på enskilda initiala förhållanden. Å andra sidan behövs en struktur för lokaliseringsarbetet och en vägledning om vad som är väsentligt att mäta vid en platsundersökning. Därför har alla platsspecifika egenskaper hos ett förvarsberg gått igenom och för var och en ställs frågan om det finns värdeområden som på ett avgörande sätt skulle försämra någon av djupförvarets isolerande eller fördröjande funktioner.

Om det är uppenbart att det finns värdeområden där djupförvarets isolering allvarligt kan hotas ställs kravet att dessa parametervärden *inte* får förekomma. Kunskapen hämtas framför allt från analysen av basscenariot. Förhållanden som kan hota t ex kapselns integritet, t ex förekomst av löst syre accepteras inte och blir därmed underlag för kravformuleringar. Kraven är inte absoluta i den meningen att djupförvaret definitivt skulle vara osäkert om kraven inte uppfylls, men ställs ändå av försiktighet. Kraven kan bara omprövas i ljuset av ny kunskap eller efter förändring av förvarets utformning.

Även om det inte går att finna grund för krav är det ofta möjligt att lägga fast önskemål om värdeområden som bidrar till god isolering eller god fördröjning. Önskemålen ger värdeområden som gynnar en önskad funktion, men behöver inte precisera gränsen till oacceptabel funktion. En sådan gräns påverkas i många fall av andra förhållanden, är relativ, är okänd eller kan påverkas genom förvarsutformning.

Utgångspunkten för önskemål har varit de värdeområden som analyserats i SR 97, kompletterat med ett övervägande om andra värdeområden skulle kunna leda till ännu bättre funktion. Kunskapen hämtas från de detaljerade analyserna av främst basscenariot och kapseldefekts scenariot. På liknande sätt bestäms önskemål på berget ur perspektivet byggbarhet/teknik.

Kraven och önskemålen har formulerats för att ge vägledning i lokaliseringsarbetet och för att kunna prioritera undersökningsinsatser vid platsundersökningar. De ersätter inte behovet av samlade och fullständiga säkerhetsanalyser.

13.3.2 Program för platsundersökningar

Identifieringen av geovetenskapliga lämplighetsindikatorer utgör i sin tur en av de viktigaste utgångspunkterna för SKB:s program för undersökning och utvärdering av platser, som kommer att presenteras under år 2000. Undersökningen ska ge underlag för att bedöma värdeområden för väsentliga geovetenskapliga faktorer på aktuella platser. Kriterier för platsutvärdering används också för att prioritera undersökningarnas omfattning och ger möjlighet till snabbare återkoppling till säkerhetsanalysen när undersökningsresultat blir tillgängliga. Även biosfären på platsen kartläggs.

Platsundersökningsprogrammet omfattar dock mer än den information som efterfrågas av säkerhetsanalysen. Undersökningarna ska ge grund för en övergripande geovetenskaplig förståelse och många undersökningar ger i sig inte direkta data till analyser, utan används när data ska tolkas. Även dessa frågor behandlas och diskuteras då platsundersökningsprogrammet formuleras.

13.4 Underlag för funktionskrav

Enligt SKI:s krav på SR 97 ska säkerhetsanalysen ge underlag för att "härläda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna".

Säkerhetsanalysen kan göra detta i en generell bemärkelse. Genom studiet av de olika scenarierna beskrivs vilka yttre påfrestningar förvarssystemet kan komma att utsättas för. Förvaret ska enkelt uttryckt konstrueras för att fungera under dessa påfrestningar, vilket är en mycket generell formulering av funktionskrav. Kravet gäller för systemet som helhet. Det är bara i vissa fall möjligt att ur omgivningsförhållanden direkt formulera krav för enskilda barriärer. Ett exempel där detta är möjligt:

Kapseln ska klara de hydrostatiska tryck och svälltryck som förekommer i basscenariot och även de maximala hydrostatiska tryck som kan bli följden av en glaciation. Båda dessa tryck kvantifieras i SR 97 och därmed utgör analysen underlag för funktionskrav på kapseln, som ska behålla sin isolerande funktion vid dessa tryck.

När det gäller tektoniska förändringar blir det svårare att formulera funktionskrav. Effekten av ett jordskalv kan styras med förvarsutformningen och även om denna lagts fast beror effekterna av ett jordskalv av utformningen av kombinationen kapsel/buffert. De mekaniska effekterna på kapseln styrs bl a av bufferttjockleken och det är kombinationen av de två barriärerna som bestämmer funktionen.

Från grundvattensammansättningen i de olika scenarierna kan funktionskrav härledas för bufferten: Bufferten ska behålla sin avsedda funktion då grundvattnet har de sammansättningar som kan bli aktuella vid förvarsplatsen under olika tidsepoker i både bas- och kapseldefektscenarierna. SR 97 ger ett kvantitativt underlag för detta i form av uppskattningar av de olika sammansättningar som kan bli aktuella i svensk berggrund.

Funktionskrav för kapseln kan inte lika uppenbart härledas ur grundvattensammansättningen: Bufferten och kapseln bestämmer tillsammans hur kapselns isolerande funktion klarar de kemiska påfrestningarna. Funktionskrav för kapseln kan inte härledas direkt ur resultatet från analysen, däremot ska funktionen hos systemet kapsel/buffert vara sådan att kapselns isolering inte äventyras i ett långt tidsperspektiv.

Säkerhetsanalysen kvantifierar omgivningsförhållandena och talar sedan om huruvida den valda systemutformningen fungerar under dessa förhållanden. Däremot är analysmetodiken i allmänhet inte inriktad på att utreda vilka detaljerade egenskaper barriärerna (minst) måste ha för att "tåla" påfrestningarna. Detta s k inversproblem har för övrigt inte någon entydig lösning.

SR 97 ger således kvantitativt underlag i form av grundvattensammansättningar, -flöden och -tryck, berggrörelser och annat som kan användas för att eventuellt modifiera förvarsutformningen, men det är endast i få fall som funktionskrav direkt kan härledas ur analysresultatet.

Översyn av förvarets utformning

Utformningen av djupförvaret är baserad på det primära kravet att förvaret ska isolera avfallet från människa och miljö. Om isoleringen av någon anledning skulle brytas ska förvaret i andra hand ha en fördröjande funktion. Med utgångspunkt från dessa grundläggande funktionskrav fastläggs mer detaljerade funktionskrav för kapseln och de övriga barriärerna. Utöver kraven för den långsiktiga säkerheten tillkommer krav för att möjliggöra tillverkning, bygge och drift.

Den detaljerade förvarsutformningen kommer stegvis att utvecklas i ett långsiktigt arbete och under tiden genomförs ett antal säkerhetsanalyser. Resultatet från varje analys återförs till arbetet med förvarsutformningen och leder eventuellt till modifieringar av funktionskrav, konstruktionsförutsättningar och utformning av olika delar. Ändringar av detaljer i utformningen initieras också av erfarenheter från utvecklingen av teknik för utförande av de olika delarna i förvaret. Den modifierade utformningen blir sedan utgångspunkten för nästa säkerhetsanalys.

Resultatet av arbetet med SR 97 kommer att användas som ett underlag för en översyn av de funktionskrav och konstruktionsförutsättningar som bestämmer utformningen av kapseln och de övriga barriärerna i djupförvaret.

13.5 Prioritering av forskning

Erfarenheterna från SR 97 utgör också en grund för utveckling av metodiken för kommande säkerhetsanalyser liksom för prioriteringar i programmen för stödjande forskning, utveckling och teknikdemonstration.

Metodik för säkerhetsanalys

Programmet för vidareutveckling av säkerhetsanalysmetodik enligt FUD-98 kommer att utvärderas med hänsyn till erfarenheterna från SR 97 och dess granskning. Behov inför kommande säkerhetsanalyser som identifierats i SR 97 är bl a:

- en reviderad Processrapport,
- en utredning av möjligheterna till ett mer systematiskt scenarival samt,
- en utvärdering av probabilistiska beräkningsmetoder.

Stödjande forskning

I programmet för stödjande forskning kan resultatet av SR 97 användas för prioriteringar vad gäller FoU-insatser kring djupförvaring av använt kärnbränsle. Förutom årliga programöversikter, kommer en mer genomgripande revision att göras i anslutning till FUD-program 2001. Resultaten av SR 97 antyder flera områden som kan behöva prioriteras, bl a:

- biosfärsmodellering,
- jordskalvsmodellering,
- långsiktiga effekter av kryprörelser i berget,
- de mekaniska effekterna på kapseln vid tektoniska berg rörelser, bl a krypeffekter i kopparhöljet,
- återfyllningens funktion i allmänhet,
- erosion av buffert och återfyllning under olika klimatförhållanden,
- den hydromekaniska utvecklingen av spalten mellan kapsel och buffert i tidiga skeden,
- modeller för hydrologi och radionuklidtransport i detaljskala kring deponeringshål för att möjliggöra optimala val av deponeringshål.
- bränsleupplösning.

Behoven har identifierats antingen direkt i Processrapporten eller då den integrerade utvecklingen till följd av flera kopplade processer studerats i säkerhetsanalysen. Ofta skulle nya rön kunna leda till mindre pessimistiska hanteringar i säkerhetsanalysen.

Kvalitetskontroll

Kvalitetskontroll är väsentligt för att säkerställa analysernas tillförlitlighet. Kvalitetsaspekter kan läggas på data, modeller och värderingar. Spårbarhet och möjlighet att återskapa resultat är andra viktiga aspekter. Ett QA-kontrollerat system för datainsamling och databevarande har prövats vid Äspö-laboratoriet. Ett versionshanteringssystem har utnyttjats för modeller för grundvattenflöde och radionuklidtransport i SR 97. För dessa beräkningar arkiveras förutsättningar, indata och resultat digitalt med gängse säkerhetsrutiner eller som papperskopior enligt SKB:s arkivregler.

Rutinerna för kvalitetskontroll av säkerhetsanalysen behöver utvecklas. SKB avser att företaget ska vara certifierat med ett komplett QA-system enligt ISO 9001 när platsundersökningarna påbörjas. Säkerhetsanalysen omfattas av certifieringen.

13.6 Slutord

Det kommande steget i lokaliseringen av ett djupförvar innebär att berggrunden vid ett antal kandidatplatser för ett förvar ska undersökas. Huvudsyftet med SR 97 är att inför det steget ”göra troligt att KBS 3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskyddskrav som SKI och SSI preciserat de senaste åren”.

De strålnivåer som svenska myndigheter accepterar för individer i närheten av ett djupförvar ligger kring en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen. Resultaten av analyserna i SR 97 visar maximala nivåer som är mindre än en tiondel av myndighetskraven. De maximala nivåerna uppkommer tiotusentals år in i framtiden och under de förhållandevis korta tidsintervall då tänkbara förvarsplatser i Sverige inte förväntas vara täckta av inlandsis eller hav.

Resultaten ska också ses i ljuset av det försiktiga förhållningssätt som genomsyrar utförandet av säkerhetsanalysen. Om kunskapen inom något område inte är fullständig antas pessimistiskt ett sämre utfall än vad som är rimligt att förvänta.

SR 97 visar att förutsättningarna för att bygga ett säkert djupförvar för använt kärnbränsle i svensk granitisk berggrund är mycket goda. Analysen är i ett internationellt perspektiv omfattande och detaljerad mot bakgrund av det steg SKB står inför.

Det är SKB:s bedömning att säkerhetsanalysens omfattning och tilltron till dess resultat väl uppfyller de krav som bör ställas inför ett sådant steg.

Referensbränslet

Tabell 1-1. Data för referensbränslet, SVEA 96.

Område	Beskrivning	Sort	Data
	Bränsletypsbeteckning		SVEA 96
Allmänt	Bränsleknippets tillverkare		ABB ATOM
	Licensieringsdatum CLAB		1989-07-07
	Licensieringsdatum Transportsystemet		1989-07-07
	Referensdokument 1		G6264,8
	Referensdokument 2		C-264.13
	Sammanställningsritning - bränsleknippe		AA273730
	Sammanställningsritning - box		AA273791
	Ritning nr		AA273728
	Längd av bränsleknippe utan box	mm	4042,1
	Längd av bränsleelement med box	mm	4422,00
	Vikt av bränsleelement utan box	kg	243,20
	Volym av knippe (undanträngd vattenvolym)	m3	0,03
	Längd av ändzon (botten)	mm	56
	Längd av ändzon (topp)	mm	273,5
	Elementets fyrkantmått - minsta	mm	140,20
	Elementets fyrkantmått - största	mm	153,00
	Mängd UO ₂ i knippet	kg	195
	Mängd Utot i knippet	kg	171
	Initialanrikning (max kutsanrikning)	%U235	
	Initialanrikning (medelanrikning i värsta snittet)	%U235	3,461
	Initialanrikning (medel i knippet)	%U235	3,27
	BA-typ		Gd203
	Halt av BA	%	4
	Bränslepelarens längd	mm	3710
	Knippts ungefärliga längdökning på grund av bestrålningen	mm	15
	Beräknad medelutbränning i knippet	MWd/tU	43000
	Knippe	Stavmatrix	
Antal delknippen			4
Vikt av ett delknippe		kg	60,8
Stavdelning - minsta		mm	12,7
Stavdelning - största		mm	
Stavar	Antal stavar i knippet totalt		96
	Antal bränslestavar		96
	Längd av normal bränslestav		
	Längd av bärande bränslestav	mm	4041
	Längd av spridarstav	mm	4004,5
	Antal dellånga stavar		
	Längd av dellång stav	mm	
	Vikt (UO ₂) i BA-stav	kg	2
	Vikt (UO ₂) i normalstav	kg	2,03
	Ytterdiameter av bränslestav - största	mm	9,66
	Ytterdiameter av bränslestav - minsta	mm	9,58
	Zr-vikt i bärande bränslestav	kg	0,49
	Zr-vikt i normal bränslestav	kg	0,47
Zr-vikt i spridarstav	kg	0,48	
Kuts	UO ₂ -täthet i bränslekuts största	g/cc	10,62
	UO ₂ -täthet i bränslekuts minsta	g/cc	10,42
	UO ₂ -täthet i bränslekuts med BA	g/cc	10,52
	Diameter av UO ₂ -bränslekuts största	mm	8,203
	Diameter av UO ₂ -bränslekuts minsta	mm	8,177

Data för beräkning av radionuklidtransport

Innehåll

1.1 Inventarium	460
1.2 Bränsleupplösning	461
1.3 Kapselskador, skadetillväxt och fördröjningstid	461
1.4 Lösligheter	462
1.5 Sorption och diffusion i bufferten	463
1.6 Sorption och diffusion i återfyllning	464
1.7 Grundvattenflöden i närområdet	465
1.8 Sorption och diffusion i bergmatrisen	466
1.9 Flödesrelaterade transportparametrar	467
1.10 Biosfären	468

1.1 Inventarium

Tabell 2-1. Inventarium i Bq/tU baserat på BWR element med en utbränningsgrad om 38 MWd/kg U och 40 år efter uttaget från reaktorn /baserad på tabell 9 i Håkansson, 1998/.

Nuklid	Aktivitet (Bq/t U)	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U)	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U)
Fissionsprodukter		Aktinider		Aktiveringsprodukter	
H-3	$2,1 \cdot 10^{12}$	Ra-226	$1,4 \cdot 10^5$	H-3	$1,1 \cdot 10^{12}$
Se-79	$2,8 \cdot 10^9$	Th-229	$1,0 \cdot 10^4$	C-14	$5,0 \cdot 10^{10}$
Kr-85	$2,7 \cdot 10^{13}$	Th-230	$1,6 \cdot 10^7$	Cl-36	$5,5 \cdot 10^8$
Sr-90	$1,2 \cdot 10^{15}$	Th-234	$1,2 \cdot 10^{10}$	Fe-55	$9,3 \cdot 10^9$
Y-90	$1,2 \cdot 10^{15}$	Pa-231	$1,8 \cdot 10^6$	Co-60	$8,9 \cdot 10^{11}$
Zr-93	$5,0 \cdot 10^{10}$	Pa-233	$1,5 \cdot 10^{10}$	Ni-59	$8,8 \cdot 10^{10}$
Nb-93m	$4,2 \cdot 10^{10}$	Pa-234m	$1,2 \cdot 10^{10}$	Ni-63	$9,3 \cdot 10^{12}$
Tc-99	$5,7 \cdot 10^{11}$	U-233	$3,1 \cdot 10^6$	Sr-90	$2,6 \cdot 10^7$
Ru-106	$2,7 \cdot 10^4$	U-234	$4,6 \cdot 10^{10}$	Y-90	$2,6 \cdot 10^7$
Pd-107	$4,9 \cdot 10^9$	U-235	$4,5 \cdot 10^8$	Zr-93	$5,6 \cdot 10^9$
Cd-113m	$1,7 \cdot 10^{11}$	U-236	$1,0 \cdot 10^{10}$	Nb-93m	$2,3 \cdot 10^{10}$
Sn-121	$4,4 \cdot 10^{10}$	U-237	$1,9 \cdot 10^{10}$	Nb-94	$2,9 \cdot 10^9$
Sn-121m	$5,7 \cdot 10^{10}$	U-238	$1,2 \cdot 10^{10}$	Mo-93	$4,4 \cdot 10^7$
Sb-125	$1,1 \cdot 10^{10}$	Np-237	$1,5 \cdot 10^{10}$	Ag-108	$4,3 \cdot 10^7$
Te-125m	$2,7 \cdot 10^9$	Np-239	$1,2 \cdot 10^{12}$	Ag-108m	$5,0 \cdot 10^8$
Sn-126	$2,3 \cdot 10^{10}$	Pu-238	$9,5 \cdot 10^{13}$	Cd-113m	$3,4 \cdot 10^{10}$
Sb-126m	$2,3 \cdot 10^{10}$	Pu-239	$9,5 \cdot 10^{12}$	Sn-121	$1,4 \cdot 10^{10}$
I-129	$1,3 \cdot 10^9$	Pu-240	$1,2 \cdot 10^{13}$	Sn-121m	$1,7 \cdot 10^{10}$
Cs-134	$9,1 \cdot 10^9$	Pu-241	$7,7 \cdot 10^{14}$	Sb-125	$1,2 \cdot 10^9$
Cs-135	$2,1 \cdot 10^{10}$	Pu-242	$1,0 \cdot 10^{11}$	Te-125m	$3,0 \cdot 10^8$
Cs-137	$1,8 \cdot 10^{15}$	Am-241	$1,5 \cdot 10^{14}$	Eu-154	$3,2 \cdot 10^{11}$
Ba-137m	$1,7 \cdot 10^{15}$	Am-242m	$4,5 \cdot 10^{11}$	Eu-155	$1,3 \cdot 10^{10}$
Pm-146	$9,8 \cdot 10^8$	Am-242	$4,5 \cdot 10^{11}$	Ho-166m	$7,5 \cdot 10^7$
Pm-147	$1,5 \cdot 10^{11}$	Am-243	$1,2 \cdot 10^{12}$	Total	$1,2 \cdot 10^{13}$
Sm-151	$9,4 \cdot 10^{12}$	Cm-242	$3,7 \cdot 10^{11}$		
Eu1-52	$3,3 \cdot 10^{10}$	Cm-243	$4,4 \cdot 10^{11}$		
Eu-154	$1,8 \cdot 10^{13}$	Cm-244	$2,8 \cdot 10^{13}$		
Eu-155	$7,6 \cdot 10^{11}$	Cm245	$9,4 \cdot 10^9$		
Total	$6,0 \cdot 10^{15}$	Cm-246	$2,9 \cdot 10^9$		
		Total	$1,1 \cdot 10^{15}$		

1.2 Bränsleupplösning

Tabell 2-2. Bränsleupplösning.

Fall	Beskrivning
Rimlig uppskattning	Konstant hastighet 10^{-8} år ⁻¹

Tabell 2-3. Fraktion av inventariet som är omedelbart tillgänglig (IRF) /tabellen baseras på tabell 3 i Johnson och Tait, 1997, kombinerat med antaganden om metalldelarna/.

Nuklid	IRF(%) Rimligt enbart bränsle	IRF(%) Rimligt inklusive metalldelar	IRF(%) Pessimistiskt inklusive metalldelar
C-14	5	15	55
Cl-36	6	6	12
Co-60	-	-	-
Ni-59	-	100	100
Ni-63	-	100	100
Se-79	3	3	6
Kr-85	2	2	4
Sr-90	0,25	0,25	1
Zr-93	-	-	-
Nb-94	-	100	100
Tc-99	0,2	0,2	1
Pd-107	0,2	0,2	1
Ag-108m	3	100	100
Cd-113m	3	3	6
Sn-126	2	2	4
I-129	3	3	6
Cs-135	3	3	6
Cs-137	3	3	6
Sm-151	-	-	-
Eu-154	-	-	-
Ho-166m	-	-	-
Aktinider	-	-	-

1.3 Kapselskador, skadetillväxt och fördröjningstid

Tabell 2-4. Kapselskador, skadetillväxt och fördröjningstid (se Datarapporten).

Fall	Initial skada	Tillväxt	Fördröjningstid
Rimligt	1 kapsel med 1 mm ² cirkulär skada	Fullständig skada (dvs stor nog att inte hindra uttransport) vid fördröjningstiden. Innan dess ändras inte skadans storlek.	$2 \cdot 10^5$ år
Pessimistiskt	5 kapslar med 1 mm ² (1 µm bred 1 m lång) skada	Fullständig skada (se ovan) efter 20 000 år.	300 år

1.4 Lösligheter

Tabell 2-5. Löslighetsbegränsande faser, specieringar och lösligheter för de tre försvarsplatserna i SR 97.

Element	Löslighetsbegränsande fas	Dominerande specie	Aberg Rimligt (mol/l)	Beberg Rimligt (mol/l)	Ceberg Rimligt (mol/l)	Alla platser Pessimistiskt (mol/l)
Ag	AgCl	AgCl _x ^{y-}	2,96 · 10 ⁻⁵	9,39 · 10 ⁻⁷	7,12 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁵
Am	AmOHCO ₃	Am(OH) ₂ ⁺ , AmCO ₂ ⁺ , AmOH ²⁺	6,87 · 10 ⁻⁷	9,36 · 10 ⁻⁸	9,34 · 10 ⁻⁸	7 · 10 ⁻⁶
Cm	CmOHCO ₃	CmOH ²⁺	2,22 · 10 ⁻⁷	2,02 · 10 ⁻⁹	9,01 · 10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻⁶
Ho	Ho ₂ (CO ₃) ₂	HoCO ₃ ⁺ , Ho(CO ₃) ₂ ⁻	6,27 · 10 ⁻⁶	5,58 · 10 ⁻⁶	5,58 · 10 ⁻⁶	6 · 10 ⁻⁵
Nb	Nb ₂ O ₅	NbO ₃ ⁻	1,37 · 10 ⁻³	1,37 · 10 ⁻³	1,39 · 10 ⁻³	4 · 10 ⁻²
Ni	NiO	Ni ²⁺ , NiCO ₃	hög	hög	hög	hög
Np	Np(OH) ₄	Np(OH) ₄ , Np(OH) ₃ CO ₃ ⁻ , Np(HPO ₄) ₄ ⁶⁻	5,87 · 10 ⁻⁸	1,05 · 10 ⁻⁷	5,87 · 10 ⁻⁸	2 · 10 ⁻⁷
Pa	Pa ₂ O ₅	PaO ₂ OH	3,16 · 10 ⁻⁷	3,16 · 10 ⁻⁷	3,16 · 10 ⁻⁷	4 · 10 ⁻⁷
Pd	PdO	Pd(OH) ₂	4,21 · 10 ⁻⁹	4,17 · 10 ⁻⁹	4,18 · 10 ⁻⁹	8 · 10 ⁻⁹
Pu	Pu(OH) ₄	Pu(OH) ₄ , PuCO ₃ ⁺ , Pu ³⁺	6,56 · 10 ⁻⁹	5,35 · 10 ⁻¹⁰	1,38 · 10 ⁻¹⁰	3 · 10 ⁻⁶
Ra	RaSO ₄	Ra ²⁺ , RaSO ₄	2,86 · 10 ⁻⁷	5,02 · 10 ⁻⁷	1,20 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴
Se	FeSe ₍₂₎ /Selen	HSe ⁻	2,59 · 10 ⁻⁹	2,59 · 10 ⁻⁹	2,59 · 10 ⁻⁹	hög
Sm	Sm ₂ (CO ₃) ₂	SmCO ₃ ⁺ , Sm(CO ₃) ₂ ⁻	2,13 · 10 ⁻⁶	8,03 · 10 ⁻⁷	8,03 · 10 ⁻⁷	2 · 10 ⁻⁵
Sn	SnO ₂	Sn(OH) ₄ , Sn(OH) ₅ ⁻	5,52 · 10 ⁻¹⁰	6,03 · 10 ⁻¹⁰	4,68 · 10 ⁻⁹	1 · 10 ⁻⁵
Sr	Celestit/ Strontianit	Sr ²⁺	6,88 · 10 ⁻³	3,09 · 10 ⁻³	1,21 · 10 ⁻⁴	4 · 10 ⁻²
Tc	TcO ₂	TcO(OH) ₂	7,67 · 10 ⁻⁹	7,92 · 10 ⁻⁹	7,67 · 10 ⁻⁹	5 · 10 ⁻⁸
Th	Th(OH) ₄	Th(OH) ₄ , Th(HPO ₄) ₃ ²⁻	1,22 · 10 ⁻⁹	1,22 · 10 ⁻⁹	1,22 · 10 ⁻⁹	2 · 10 ⁻⁹
U	UO ₂	U(OH) ₄	1,28 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	2 · 10 ⁻⁷
Zr	ZrO ₂	Zr(OH) ₄	2,48 · 10 ⁻⁹	2,51 · 10 ⁻⁹	2,51 · 10 ⁻⁹	3 · 10 ⁻⁹

1.5 Sorption och diffusion i bufferten

Tabell 2-6. K_d -värden och diffusiviteter i bufferten ($\rho = 2\,000\text{ kg/m}^3$).

Ämne	K_d (m^3/kg)		D_e (m^2/s)	Porositet
	Rimligt	Pessimistiskt		
C	0	0	$3 \cdot 10^{-11}$	0,41
Cl	0	0	$1 \cdot 10^{-12}$	0,05
Ni	0,1	0,02	$1 \cdot 10^{-9}$	0,41
Se	0,003	0	$7 \cdot 10^{-11}$	0,41
Sr	0,01	0,001	$5 \cdot 10^{-10}$	0,41
Zr	2	0,05	$5 \cdot 10^{-11}$	0,41
Nb	0,2	0	$5 \cdot 10^{-10}$	0,41
Tc	0,1	0,01	$5 \cdot 10^{-10}$	0,41
Pd	0,01	0	$1 \cdot 10^{-10}$	0,41
Ag	0	0	$2 \cdot 10^{-10}$	0,41
Sn	3	0,01	$7 \cdot 10^{-11}$	0,41
I	0	0	$3 \cdot 10^{-12}$	0,05
Cs	0,05	0,005	$6 \cdot 10^{-10}$	0,41
Ce	1	0,2	$2 \cdot 10^{-10}$	0,41
Sm	1	0,2	$2 \cdot 10^{-10}$	0,41
Ho	1	0,2	$2 \cdot 10^{-10}$	0,41
Pb	0,5	0	$1 \cdot 10^{-9}$	0,41
Rn	0	0	$3 \cdot 10^{-11}$	0,41
Ra	0,01	0,001	$5 \cdot 10^{-10}$	0,41
Th	3	0,1	$7 \cdot 10^{-11}$	0,41
Pa	0,3	0,001	$7 \cdot 10^{-10}$	0,41
U	1	0,01	$5 \cdot 10^{-10}$	0,41
Np	3	0,1	$1 \cdot 10^{-9}$	0,41
Pu	3	1	$3 \cdot 10^{-10}$	0,41
Am	3	1	$7 \cdot 10^{-11}$	0,41
Cm	3	1	$7 \cdot 10^{-11}$	0,41

1.6 Sorption och diffusion i återfyllning

Tabell 2-7. Diffusivitet och porositet i återfyllning.

Fall	D_e (m ² /s)	Porositet
Samtliga fall och platser	10 ⁻¹⁰ m ² /s	0,30

Tabell 2-8. K_d -värden i återfyllning beräknade som 15 procent av bentonitvärden /Yu och Neretnieks, 1997/ och 85 procent sand- (kvarts-) värden /Carbol och Engkvist, 1997/.

Ämne	K_d (m ³ /kg) Rimligt Aberg (salt)	Rimligt Beberg och Ceberg (ej salt)	Pessimistiskt Alla platser (salt)
C	0,0009	0,0009	0,0004
Cl	0	0	0
Ni	0,03	0,1	0,01
Se	0,001	0,001	0,0004
Sr	0,002	0,08	0,0002
Zr	1	1	0,5
Nb	0,9	0,9	0,4
Tc	0,9	0,9	0,3
Pd	0,01	0,09	0,0009
Ag	0,05	0,5	0,009
Sn	0,5	0,5	0,002
I	0	0	0
Cs	0,05	0,5	0,009
Sm	2	2	0,9
Ho	2	2	0,9
Ra	0,02	0,2	0,009
Th	5	5	0,9
Pa	0,9	1	0,4
U	4	4	0,9
Np	5	5	0,9
Pu	5	5	1
Am	3	3	1
Cm	3	3	1

1.7 Grundvattenflöden i närområdet

Tabell 2-9. Specifika flöden i närområdet q_0 (m/år).

Fall	Aberg	Beberg	Ceberg
Rimligt	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Pessimistiskt	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Probabilistiskt	Basfallet i Walker och Gylling /1998/	Basfallet i Gylling mfl. /1999/	Basfallet i Walker och Gylling /1999/

Tabell 2-10. Icke platsspecifika parametrar till närområdesmodellen COMP23.

Parameter	Rimligt	Pessimistiskt
Specifika flöden		
q_1	q_0	$5q_0$
q_2	$10q_0$	$100q_0$
q_3	$100q_0$	$1\,000q_0$
q_4	$100q_0$	$1\,0000q_0$
Porositet		
ε_1	10^{-4}	10^{-3}
ε_2	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
ε_3	10^{-3}	10^{-3}
ε_4	10^{-3}	10^{-3}

1.8 Sorption och diffusion i bergmatrisen

Tabell 2-11. Bergmatrisens porositet.

Ämne	Aberg	Beberg	Ceberg
Br, C, Cl, I	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Övriga	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

Tabell 2-12. Bergmatrisens diffusivitet.

Ämne	$D_e \cdot 10^{13}$ (m ² /s) Rimligt Aberg (salt)	Rimligt Beberg och Ceberg (ej salt)	Pessimistiskt Alla platser
C/HCO ₃	0,50	0,05	0,005
Na/Na (I)	0,54	5	0,05
Cl/Cl	0,83	0,08	0,008
Co/Co (II)	0,29	0,29	0,029
Ni/Ni (II)	0,28	0,28	0,028
Se/Se (IV, VI)	0,4	0,4	0,04
Br/Br	0,83	0,08	0,008
Kr (Inert gas)	0,4	0,4	0,04
Sr/Sr (II)	0,33	3	0,03
Zr/Zr (IV)	0,4	0,4	0,04
Nb/Nb (V)	0,4	0,4	0,04
Tc/TcO ₄	0,4	0,04	0,004
Tc/Tc (IV)	0,4	0,4	0,04
Pd/Pd (II)	0,4	0,4	0,04
Ag/Ag (I)	0,71	0,71	0,071
Cd/Cd (II)	0,30	0,30	0,030
Sn/Sn (IV)	0,4	0,4	0,04
I/I	0,83	0,08	0,008
Cs/Cs (I)	0,88	9	0,09
Sm/Sm (III)	0,4	0,4	0,04
Eu/Eu (III)	0,4	0,4	0,04
Ho/Ho (III)	0,4	0,4	0,04
Ra/Ra (II)	0,37	0,37	0,037
Ac/Ac (III)	0,4	0,4	0,04
Th/Th (IV)	0,063	0,063	0,0063
Pa/Pa (IV, V)	0,4	0,4	0,04
U/U (IV)	0,4	0,4	0,04
Np/Np (IV)	0,4	0,4	0,04
Pu/Pu (III, IV)	0,4	0,4	0,04
Am/Am (III)	0,4	0,4	0,04
Cm/Cm (III)	0,4	0,4	0,04

Tabell 2-13. K_d -värden i bergmatrisen /från tabell 12-1 i Carbol och Engkvist, 1997 och Datarapporten/.

Ämne	Kemisk form/ redox tillstånd	K_d (m ³ /kg) Rimligt Aberg	Rimligt Beberg och Ceberg	Pessimistiskt Aberg och Beberg	Pessimistiskt Ceberg
C	HCO ₃ ⁻	0,001	0,001	0,0005	0,0005
Cl	Cl ⁻	0	0	0	0
Co	Co (II)	0,02	0,1	0,01	0,05
Ni	Ni (II)	0,02	0,1	0,01	0,05
Se	Se (-II, IV, VI)	0,001	0,001	0,0005	0,0005
Kr	inert gas	0	0	0	0
Sr	Sr (II)	0,0002	0,01	0,0001	0,005
Zr	Zr (II)	1	1	0,5	0,5
Nb	Nb (V)	1	1	0,5	0,5
Tc	Tc (IV)	1	1	0,3	0,3
Pd	Pd (II)	0,01	0,1	0,001	0,01
Ag	Ag (I)	0,05	0,5	0,01	0,1
Cd	Cd (II)	0,02	0,1	0,01	0,05
Sn	Sn (IV)	0,001	0,001	0	0
I	I ⁻	0	0	0	0
Cs	Cs (I)	0,05	0,5	0,01	0,1
Sm	Sm (III)	2	2	1	1
Eu	Eu (III)	2	2	1	1
Ho	Ho (III)	2	2	1	1
Ra	Ra (II)	0,02	0,1	0,01	0,05
Ac	Ac (III)	3	3	1	1
Th	Th (IV)	5	5	1	1
Pa	Pa (IV, V)	1	1	0,5	0,5
U	U (IV)	5	5	1	1
U	U (VI)*	0,005	0,01	0,001	0,005
Np	Np (IV)	5	5	1	1
Np	Np (V)*	0,005	0,01	0,001	0,005
Pu	Pu (III, IV)	5	5	1	1
Am	Am (III)	3	3	1	1
Cm	Cm (III)	3	3	1	1

* Representerar värden för oxiderande förhållanden, ej använda.

1.9 Flödesrelaterade transportparametrar

Tabell 2-14. Flödesrelaterade parametrar till FARF31. "Gångtiden" t_w och flödesvätta ytan per volym vatten a_w kan inte ändras oberoende av varandra.

Fall	Aberg	Beberg	Ceberg
"Gångtid" (år)			
Rimligt	10	60	2 000
Pessimistiskt	0,8	3,3	400
Probabilistisk	Basfall i Walker och Gylling /1998/	Basfall i Gylling mfl. /1999/	Basfall i Walker och Gylling /1999/
a_w (m⁻¹)			
Rimlig	10 ⁴	10 ⁴	10 ³
Pessimistisk	10 ³	10 ³	10 ³
Pe			
Rimligt	10	10	10
Pessimistiskt	2	2	2
Max penetration (m)			
Rimlig	2,0	2,0	20
Pessimistisk	0,2	0,2	2,0

1.10 Biosfären

Tabell 2-15. Biosfärsparametrar.

Fall	Aberg	Beberg	Ceberg
Modul			
Rimligt	Torv, med Inre fjärden vid Aberg som variant. För samtliga platser beräknas det rimliga fallet också med plats-specifika brunnsmoduler med en kapacitet på 300 l/timme.	Torv. För samtliga platser beräknas det rimliga fallet också med plats-specifika brunnsmoduler med en kapacitet på 300 l/timme.	Torv. För samtliga platser beräknas det rimliga fallet också med plats-specifika brunnsmoduler med en kapacitet på 300 l/timme.
Pessimistiskt	Välj den modul som ger den högsta dosraten (dvs vanligen brunn, torv eller jordbruksmark) för varje enskild nuklid, kombinerat med att välja högsta EDF i osäkerhetsintervallet för dessa.	Välj den modul som ger den högsta dosraten (dvs vanligen brunn, torv eller jordbruksmark) för varje enskild nuklid, kombinerat med att välja högsta EDF i osäkerhetsintervallet för dessa.	Välj den modul som ger den högsta dosraten (dvs vanligen brunn, torv eller jordbruksmark) för varje enskild nuklid, kombinerat med att välja högsta EDF i osäkerhetsintervallet för dessa.
EDF för vald modul			
Rimligt	Median	Median	Median
Pessimistiskt	Maximala värden	Maximala värden	Maximala värden

Tabell 2-16. Rimliga EDF-värden /baseras på Nordlinder m fl, 1999/.

Nuklid	Rimliga EDF-värden (Sv/Bq)						
	Aberg			Beberg		Ceberg	
	Torv	Brunn 300 l/h	Inre fjärd	Torv	Brunn 300 l/h	Torv	Brunn 300 l/h
Ag-108m	1,9 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹²	1,1 · 10 ⁻¹⁵	1,9 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹²	1,8 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹²
Am-241	2,0 · 10 ⁻¹⁰	6,8 · 10 ⁻¹¹	1,6 · 10 ⁻¹⁴	2,0 · 10 ⁻¹⁰	6,8 · 10 ⁻¹¹	2,0 · 10 ⁻¹⁰	6,7 · 10 ⁻¹¹
Am-243	1,9 · 10 ⁻⁹	1,3 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁴	1,8 · 10 ⁻⁹	1,3 · 10 ⁻¹⁰	1,7 · 10 ⁻⁹	1,3 · 10 ⁻¹⁰
C-14	1,1 · 10 ⁻¹⁴	2,4 · 10 ⁻¹³	1,7 · 10 ⁻¹⁵	6,5 · 10 ⁻¹⁵	2,4 · 10 ⁻¹³	4,6 · 10 ⁻¹⁵	2,4 · 10 ⁻¹³
Cl-36	3,6 · 10 ⁻¹¹	7,3 · 10 ⁻¹³	1,6 · 10 ⁻¹⁶	2,2 · 10 ⁻¹¹	7,2 · 10 ⁻¹³	1,5 · 10 ⁻¹¹	6,3 · 10 ⁻¹³
Cm-245	1,2 · 10 ⁻⁹	1,6 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁴	9,8 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁰	8,1 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁰
Cs-135	4,4 · 10 ⁻¹²	1,9 · 10 ⁻¹²	7,8 · 10 ⁻¹⁶	2,7 · 10 ⁻¹²	1,9 · 10 ⁻¹²	1,8 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹²
Cs-137	4,0 · 10 ⁻¹²	5,6 · 10 ⁻¹²	4,8 · 10 ⁻¹⁵	3,5 · 10 ⁻¹²	5,6 · 10 ⁻¹²	3,1 · 10 ⁻¹²	5,6 · 10 ⁻¹²
Ho-166m	2,3 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ⁻¹²	1,3 · 10 ⁻¹⁶	1,9 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ⁻¹²
I-129	5,0 · 10 ⁻¹¹	9,2 · 10 ⁻¹¹	1,8 · 10 ⁻¹⁴	3,0 · 10 ⁻¹¹	9,1 · 10 ⁻¹¹	2,1 · 10 ⁻¹¹	7,7 · 10 ⁻¹¹
Nb-94	3,0 · 10 ⁻¹²	3,4 · 10 ⁻¹²	2,1 · 10 ⁻¹⁶	2,0 · 10 ⁻¹²	3,3 · 10 ⁻¹²	1,5 · 10 ⁻¹²	2,8 · 10 ⁻¹²
Ni-59	4,5 · 10 ⁻¹³	5,9 · 10 ⁻¹⁴	2,2 · 10 ⁻¹⁷	2,7 · 10 ⁻¹³	5,9 · 10 ⁻¹⁴	1,9 · 10 ⁻¹³	5,1 · 10 ⁻¹⁴
Ni-63	1,8 · 10 ⁻¹³	6,2 · 10 ⁻¹⁴	5,2 · 10 ⁻¹⁷	1,6 · 10 ⁻¹³	6,3 · 10 ⁻¹⁴	1,4 · 10 ⁻¹³	6,1 · 10 ⁻¹⁴
Np-237	1,8 · 10 ⁻¹⁰	4,7 · 10 ⁻¹¹	2,0 · 10 ⁻¹⁵	1,1 · 10 ⁻¹⁰	4,7 · 10 ⁻¹¹	7,5 · 10 ⁻¹¹	4,3 · 10 ⁻¹¹
Pa-231	4,7 · 10 ⁻⁹	6,8 · 10 ⁻¹⁰	1,3 · 10 ⁻¹⁴	3,5 · 10 ⁻⁹	6,8 · 10 ⁻¹⁰	2,7 · 10 ⁻⁹	6,7 · 10 ⁻¹⁰
Pd-107	1,0 · 10 ⁻¹³	2,3 · 10 ⁻¹⁴	1,2 · 10 ⁻¹⁸	6,4 · 10 ⁻¹⁴	2,3 · 10 ⁻¹⁴	4,4 · 10 ⁻¹⁴	2,0 · 10 ⁻¹⁴
Pu-239	6,2 · 10 ⁻¹⁰	2,2 · 10 ⁻¹⁰	6,4 · 10 ⁻¹⁵	4,1 · 10 ⁻¹⁰	2,3 · 10 ⁻¹⁰	3,0 · 10 ⁻¹⁰	2,3 · 10 ⁻¹⁰
Pu-240	5,2 · 10 ⁻¹⁰	1,8 · 10 ⁻¹⁰	6,3 · 10 ⁻¹⁵	3,6 · 10 ⁻¹⁰	1,9 · 10 ⁻¹⁰	2,7 · 10 ⁻¹⁰	1,9 · 10 ⁻¹⁰
Pu-242	6,3 · 10 ⁻¹⁰	2,3 · 10 ⁻¹⁰	6,1 · 10 ⁻¹⁵	4,1 · 10 ⁻¹⁰	2,4 · 10 ⁻¹⁰	3,0 · 10 ⁻¹⁰	2,3 · 10 ⁻¹⁰
Ra-226	1,7 · 10 ⁻⁹	1,2 · 10 ⁻¹⁰	1,6 · 10 ⁻¹⁴	1,2 · 10 ⁻⁹	1,1 · 10 ⁻¹⁰	9,4 · 10 ⁻¹⁰	1,1 · 10 ⁻¹⁰
Se-79	2,7 · 10 ⁻⁹	2,7 · 10 ⁻¹²	1,4 · 10 ⁻¹⁴	1,7 · 10 ⁻⁹	2,7 · 10 ⁻¹²	1,2 · 10 ⁻⁹	2,1 · 10 ⁻¹²
Sm-151	6,4 · 10 ⁻¹⁵	3,2 · 10 ⁻¹⁴	5,9 · 10 ⁻¹⁸	6,0 · 10 ⁻¹⁵	3,2 · 10 ⁻¹⁴	5,7 · 10 ⁻¹⁵	3,2 · 10 ⁻¹⁴
Sn-126	1,4 · 10 ⁻¹⁰	3,9 · 10 ⁻¹²	9,9 · 10 ⁻¹⁶	8,6 · 10 ⁻¹¹	3,9 · 10 ⁻¹²	6,1 · 10 ⁻¹¹	3,1 · 10 ⁻¹²
Sr-90	2,1 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹⁵	1,8 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹¹	1,6 · 10 ⁻¹¹	1,2 · 10 ⁻¹¹
Tc-99	7,0 · 10 ⁻¹³	5,5 · 10 ⁻¹³	1,7 · 10 ⁻¹⁷	4,2 · 10 ⁻¹³	5,5 · 10 ⁻¹³	2,9 · 10 ⁻¹³	4,7 · 10 ⁻¹³
Th-229	7,5 · 10 ⁻⁹	4,2 · 10 ⁻¹⁰	1,3 · 10 ⁻¹⁴	7,0 · 10 ⁻⁹	4,1 · 10 ⁻¹⁰	6,5 · 10 ⁻⁹	4,1 · 10 ⁻¹⁰
Th-230	4,4 · 10 ⁻⁹	2,1 · 10 ⁻¹⁰	5,4 · 10 ⁻¹⁵	4,0 · 10 ⁻⁹	2,1 · 10 ⁻¹⁰	3,7 · 10 ⁻⁹	2,0 · 10 ⁻¹⁰
U-233	1,0 · 10 ⁻¹¹	1,9 · 10 ⁻¹¹	2,6 · 10 ⁻¹⁵	6,1 · 10 ⁻¹²	1,9 · 10 ⁻¹¹	4,3 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹¹
U-234	9,8 · 10 ⁻¹²	1,8 · 10 ⁻¹¹	2,5 · 10 ⁻¹⁵	5,9 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹¹	4,1 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹¹
U-235	8,9 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹¹	2,4 · 10 ⁻¹⁵	5,4 · 10 ⁻¹²	1,7 · 10 ⁻¹¹	3,7 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ⁻¹¹
U-238	8,3 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ⁻¹¹	2,3 · 10 ⁻¹⁵	5,1 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ⁻¹¹	3,5 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ⁻¹¹
Zr-93	6,1 · 10 ⁻¹³	3,7 · 10 ⁻¹³	9,0 · 10 ⁻¹⁷	4,4 · 10 ⁻¹³	3,6 · 10 ⁻¹³	3,3 · 10 ⁻¹³	3,6 · 10 ⁻¹³

Tabell 2-17. Pessimistiska EDF-värden (detta är de maximala värdena för torv utom för C-14 som har värden för brunnen med lägsta kapaciteten på respektive plats) /baseras på Nordlinder m fl, 1999/.

Nuklid	Pessimistiska EDF-värden (Sv/Bq)		
	Aberg	Beberg	Ceberg
Ag-108m	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
Am-241	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$
Am-243	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
C-14	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-13}$
Cl-36	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
Cm-245	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-9}$
Cs-135	$3,7 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
Cs-137	$3,6 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$
Ho-166m	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$
I-129	$8,2 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Nb-94	$3,3 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$
Ni-59	$4,1 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$
Ni-63	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$
Np-237	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$7,0 \cdot 10^{-10}$
Pa-231	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Pd-107	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$7,1 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-13}$
Pu-239	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Pu-240	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$4,1 \cdot 10^{-9}$
Pu-242	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Ra-226	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
Se-79	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
Sm-151	$8,4 \cdot 10^{-14}$	$8,1 \cdot 10^{-14}$	$7,7 \cdot 10^{-14}$
Sn-126	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^{-10}$	$6,3 \cdot 10^{-10}$
Sr-90	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$
Tc-99	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$7,4 \cdot 10^{-12}$
Th-229	$9,9 \cdot 10^{-8}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$
Th-230	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
U-233	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$	$6,0 \cdot 10^{-11}$
U-234	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^{-11}$
U-235	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$7,6 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$
U-238	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$
Zr-93	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$

Tabell 2-18. Pessimistiska EDF-värden använda i de probabilistiska beräkningarna /baseras på Nordlinder m fl, 1999/.

Nuklid	Pessimistiska EDF-värden (Sv/Bq)					
	Aberg		Beberg		Ceberg	
	Torv	Brunn 300 l/h	Torv	Brunn 300 l/h	Torv	Brunn 300 l/h
Ni-59	$4,1 \cdot 10^{-12}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$
Nb-94	$3,3 \cdot 10^{-11}$	$8,3 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$8,3 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$7,3 \cdot 10^{-12}$
Sn-126	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$9,1 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$6,3 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^{-12}$
I-129	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$
Ra-226	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Th-230	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-10}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-10}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$
U-234	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^{-11}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$
U-238	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$
Pu-239	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$

Tabell 2-19. Rimliga EDF-värden för kust för Aberg använda i klimatscenariot /baseras på Norlinder m fl, 1999/.

Nuklid	Rimliga EDF-värden (Sv/Bq)
Ag-108m	$4,3 \cdot 10^{-18}$
Am-241	$2,0 \cdot 10^{-16}$
Am-243	$2,0 \cdot 10^{-16}$
C-14	$6,7 \cdot 10^{-18}$
Cl-36	$5,7 \cdot 10^{-19}$
Cm-245	$2,1 \cdot 10^{-16}$
Cs-135	$2,9 \cdot 10^{-18}$
Cs-137	$1,8 \cdot 10^{-17}$
Ho-166m	$1,9 \cdot 10^{-18}$
I-129	$1,1 \cdot 10^{-16}$
Nb-94	$1,5 \cdot 10^{-18}$
Ni-59	$9,0 \cdot 10^{-20}$
Ni-63	$2,1 \cdot 10^{-19}$
Np-237	$7,6 \cdot 10^{-18}$
Pa-231	$4,8 \cdot 10^{-17}$
Pd-107	$2,6 \cdot 10^{-20}$
Pu-239	$5,5 \cdot 10^{-17}$
Pu-240	$5,5 \cdot 10^{-17}$
Pu-242	$5,3 \cdot 10^{-17}$
Ra-226	$7,0 \cdot 10^{-17}$
Se-79	$5,3 \cdot 10^{-17}$
Sm-151	$9,1 \cdot 10^{-20}$
Sn-126	$3,8 \cdot 10^{-18}$
Sr-90	$5,0 \cdot 10^{-18}$
Tc-99	$6,1 \cdot 10^{-19}$
Th-229	$4,0 \cdot 10^{-16}$
Th-230	$1,7 \cdot 10^{-16}$
U-233	$1,1 \cdot 10^{-17}$
U-234	$1,1 \cdot 10^{-17}$
U-235	$1,0 \cdot 10^{-17}$
U-238	$9,7 \cdot 10^{-18}$
Zr-93	$9,8 \cdot 10^{-19}$

Referenser: Se referenslistan till kapitel 9.